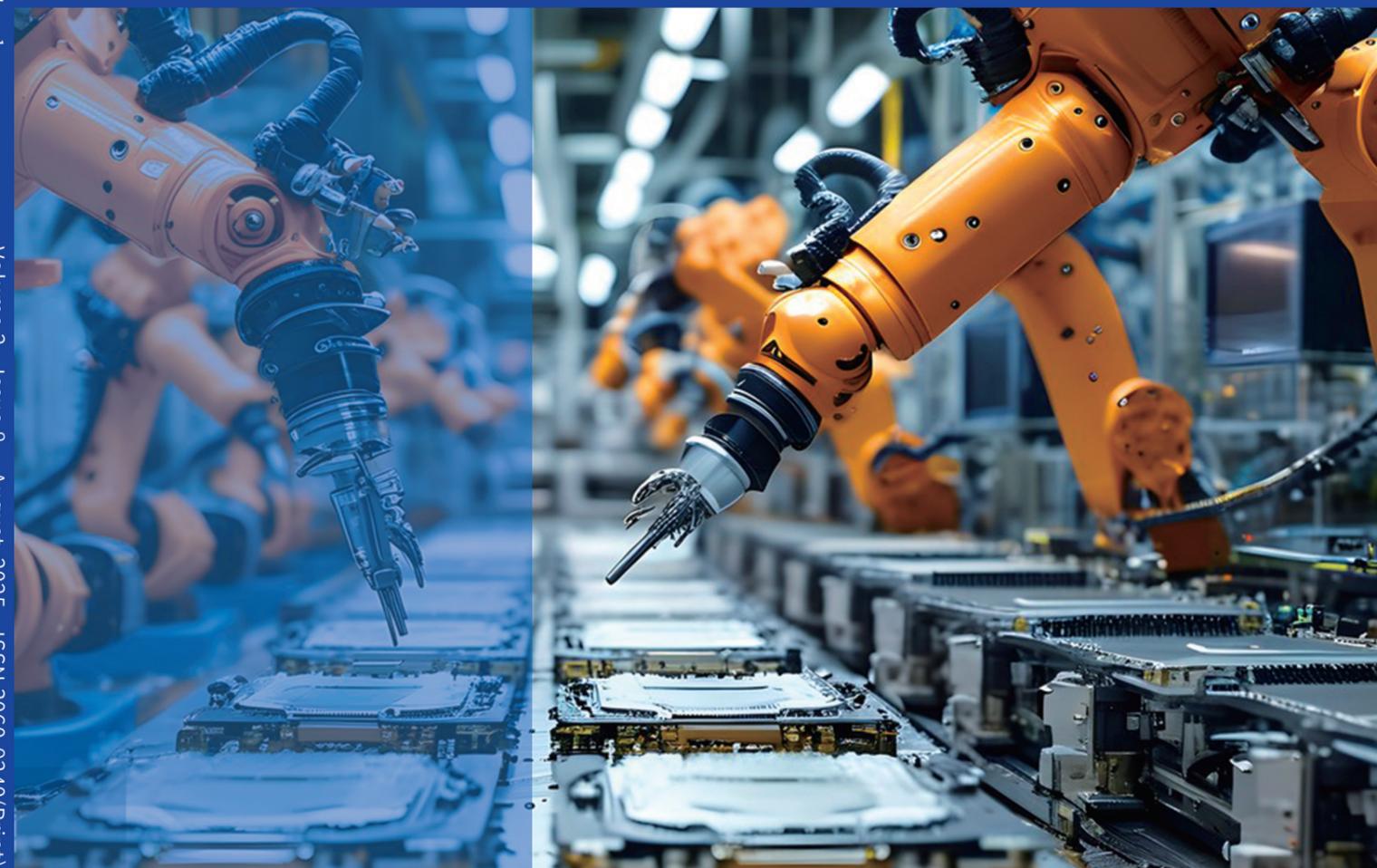


# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 8 • August 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



现代工业与技术  
Modern Industry and Technology  
Volume 2 • Issue 8 • August 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
Tel.:+65 62233839

E-mail:contact@nassg.org

Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (纸质) 3060-9259 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《现代工业与技术》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



### 期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 8· August 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

## 编委会

### 主 编

蒋 晶 郑州大学

### 编 委

李伟锋 华东理工大学

李 硕 重庆理工大学

李益国 东南大学

高学金 北京工业大学

郭乃信 通力电梯有限公司

- 1 基于不同 SERS 基底对蒺藜提取物拉曼光谱信号强度的影响研究  
/ 林萱 祁永俊 吕冠辰 马青芳 马明英
- 4 电子元器件可靠性试验方法及结果评估研究  
/ 薛明辉 张鹏
- 7 面向工程应用的电子元器件检测流程优化研究  
/ 郭可欣 李星儒
- 10 电厂能效评估与节能潜力分析  
/ 王刚
- 13 智能电网背景下继电保护技术的自适应改进与应用  
/ 吴钊滔
- 16 PLC 与变频器联合控制在化工输送系统中的应用研究  
/ 黄珂
- 19 采用物性测试及感官评价监测果冻货架期变化  
/ 罗嘉妮 王少林 刘昌树 王赛
- 23 变换汽提塔智能调控与集成蒸汽换热系统耦合优化—  
技术升级与系统能效跃升研究  
/ 皇天龙 张宏波 李兴文
- 26 火力发电厂汽轮机常见故障诊断与处理策略  
/ 王宇
- 29 新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用及力学性能分析  
/ 苏益军
- 32 特种设备作业人员三化培训考核体系创新探讨  
/ 夏晓予 田易 陈宁宁
- 35 中深孔爆破参数优化及爆破效果控制技术  
/ 刘怀宇
- 38 电梯职业技能培训发展趋势  
/ 杨宗明 廖伟 骆晓莉
- 1 A Study on the Influence of Different SERS Substrates on the Raman Spectral Signal Intensity of Tribulus Extract  
/ Xuan Lin Yongjun Qi Guanchen Lv Qingfang Ma Mingying Ma
- 4 Research on Reliability Testing Methods and Result Evaluation of Electronic Components  
/ Minghui Xue Peng Zhang
- 7 Research on the Optimization of Electronic Component Inspection Processes for Engineering Applications  
/ Kexin Guo Xingru Li
- 10 Energy Efficiency Evaluation and Energy Saving Potential Analysis of Power Plant  
/ Gang Wang
- 13 Adaptive Improvement and Application of Relay Protection Technology in Smart Grid Context  
/ Fantao Wu
- 16 Application Study of PLC and Inverter Combined Control in Chemical Conveying Systems  
/ Ke Huang
- 19 Evaluation of Jelly Shelf Life Change by Physical Property Testing Methods and Sensory evaluation  
/ Jiani Luo Shaolin Wang Changshu Liu Sai Wang
- 23 Coupling Optimization of Intelligent Control and Integrated Steam Heat Exchange System in Steam Stripping Tower: Research on Technology Upgrade and System Energy Efficiency Leap  
/ Tianlong Huang Hongbo Zhang Xingwen Li
- 26 Common Fault Diagnosis and Treatment Strategy of Steam Turbine in Thermal Power Plant  
/ Yu Wang
- 29 The synergistic application and mechanical property analysis of new wall materials and cement-based composite materials  
/ Yijun Su
- 32 Innovative Exploration of the “Three Standardizations” Training and Assessment System for Special Equipment Operators  
/ Xiaoyu Xia Yi Tian Ningning Chen
- 35 Optimization of Medium and Deep Hole Blasting Parameters and Blasting Effect Control Technology  
/ Huaiyu Liu
- 38 Trends in Vocational Skills Training for Elevator Industry  
/ Yang Wei Liao Xiaoli Luo

# A Study on the Influence of Different SERS Substrates on the Raman Spectral Signal Intensity of Tribulus Extract

Xuan Lin Yongjun Qi Guanchen Lv Qingfang Ma Mingying Ma\*

College of Chemical Engineering Qinghai University, Xining, Qinghai, 810016, China

## Abstract

**Objective** This study combines Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) with Tribulus extract preparation methods to investigate the influence of different SERS substrates on the Raman signal intensity of the extract. Taking Tribulus as the object, dehydro-N-Oxymatrine and Rutin were extracted under optimal ultrasonic conditions of 30 minutes and 80 W. AuNPs were prepared by redox method, and the spectral characteristics of target compounds were analyzed using SERS technology. The enhancement effects of six kinds of substrates including AuNPs, zinc, and aluminum were compared. Results The SERS substrate with the best enhancement effect was successfully prepared, which can provide a research basis for rapid analysis of Tribulus and quality evaluation of Chinese medicinal materials.

## Keywords

Tribulus; Dehydro-N-Oxymatrine; Rutin; SERS

# 基于不同 SERS 基底对蒺藜提取物拉曼光谱信号强度的影响研究

林萱 祁永俊 吕冠辰 马青芳 马明英\*

青海大学化工学院, 中国·青海 西宁 810016

## 摘要

**目的** 本研究结合表面增强拉曼光谱 (SERS) 与蒺藜提取方法, 探究不同 SERS 基底对其提取物拉曼信号强度的影响。以蒺藜为对象, 采用 30 min、80 W 的最佳超声条件提取去氢骆驼蓬碱、芦丁, 通过氧化还原法制备 AuNPs, 结合 SERS 技术分析目标化合物光谱特征, 对比 AuNPs、锌、铝等 6 种基底的增强效果。结果成功制备出增强效果最佳的 SERS 基底, 可为蒺藜快速分析及中药材质量评价提供研究基础。

## 关键词

蒺藜; 去氢骆驼蓬碱; 芦丁; SERS

## 1 引言

蒺藜 (*Tribulus terrestris* L.) 是临床常用药用部位相同的中、藏药材之一, 为蒺藜科蒺藜属一年生草本植物, 分布于秦岭山地、大巴山区, 野生资源丰富<sup>[1]</sup>。其全株、果实、花、茎、叶及根均可入药, 有平肝解郁, 活血祛风, 明目, 止痒等功效<sup>[2]</sup>。迄今已证实蒺藜主要化学成分有皂苷类、黄酮类、生物碱类、多糖类化合物<sup>[6-10]</sup>, 其疗效确切, 制剂多样化, 生产中的需求量逐年上升, 对其新型检测技术的深入研究显得尤为重要。随着现代药理学的发展, 越来越多

的研究揭示了蒺藜中活性成分的潜力, 然而, 由于其成分复杂且含量较低, 如何高效、快速分析这些成分一直是研究中的难点。表面增强拉曼光谱 (Surface-enhanced Raman Scattering, SERS) 作为一种高灵敏度、高选择性的检测技术, 能够实现中药材成分的微量分析。与传统的拉曼光谱相比, SERS 可通过纳米级金属基底, 如 Au、Ag 的表面等离子体共振效应显著增强拉曼信号, 远高于其他光谱检测方法<sup>[11-14]</sup>。这一特性使 SERS 技术在中药成分鉴定和质量控制方面展现出独特优势<sup>[15-16]</sup>。

本研究旨在中药提取结合 SERS 技术, 探索不同 SERS 基底对拉曼光谱信号强度的影响, 并为其检测方法的进一步发掘提供基础研究的前期技术支持。SERS 作为一种能够显著增强拉曼散射信号的技术, 能够实现微量成分的信号强度增强, 特别适用于天然药物成分的分析。通过这一研究, 以期蒺藜的进一步建立分析方法提供研究思路。

**【作者简介】** 林萱 (2003—), 女, 保安族, 中国青海海南州人, 在读本科, 从事制药工程研究。

**【通讯作者】** 马明英 (1979—), 女, 中国青海人, 博士, 讲师, 从事中藏药提取, 制备工艺研究。

## 2 仪器与材料

### 2.1 仪器

显微共焦拉曼光谱仪, 英国 Renishaw 公司; 磁力搅拌器, 艾卡(广州)仪器设备有限公司(IKA 中国); 电子天平, 华志电子科技有限公司; 数显恒温水浴锅 HH-6, 国华电气有限公司; 超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; 粉碎机, 永康市红太阳机电有限公司。

### 2.2 实验材料及试剂

对照品去氢骆驼蓬碱(批号: P3426551, 质量分数 $\geq 98\%$ ), 购于埃法生物科技有限公司、芦丁(批号: S603112537, 质量分数 $\geq 98\%$ ), 购于上海土峰生物科技有限公司; 氯金酸(北京百灵威科技有限公司)、氨水(上海麦克林生化科技有限公司)、石油醚、无水乙醇、甲醇、乙酸乙酯均为分析纯试剂。本实验中所用蒺藜干燥果实均购于八一路市场。

## 3 方法与结果

### 3.1 样品的制备

#### 3.1.1 蒺藜中去氢骆驼蓬碱的提取

将蒺藜(干燥果实)粉碎后过 40 目筛, 得粒度均匀的粉末。称取 10 g 蒺藜粉末, 加入石油醚(沸程 60-90 $^{\circ}\text{C}$ ) 100 mL, 室温超声提取 30 min(功率 80 W), 去除脂溶性杂质。滤去上层石油醚相, 残渣室温挥发溶剂。在脱脂后的蒺藜粉末中加入 10% 氨水溶液 100 mL, 润湿后搅拌 30 min, 使生物碱游离。再加入乙酸乙酯(体积比为 1:20), 静置分层, 收集上层乙酸乙酯溶液。残渣再次加入乙酸乙酯 100 mL, 重复超声提取 2 次, 合并所有乙酸乙酯萃取液。将合并的乙酸乙酯萃取液经无水硫酸钠干燥, 过滤去除水分, 蒸发(45 $^{\circ}\text{C}$ )浓缩至近干, 得到去氢骆驼蓬碱的粗提物。

#### 3.1.2 蒺藜中芦丁的提取

将粉碎后的蒺藜过 40 目筛, 称取 10 g 蒺藜粉末, 加入石油醚(沸程 60-90 $^{\circ}\text{C}$ ) 100 mL, 室温超声脱脂 30 min(功率 80 W), 离心弃去石油醚层, 室温挥发溶剂后残渣中按料液比 1:20 加入 80% 乙醇溶液, 超声提取(80 W, 40 min), 提取结束后, 静置冷却至室温, 将提取液过滤, 收集上清液, 残渣重复提取 2 次(乙醇用量减半), 合并所有上清液。蒸发(温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ )浓缩至无醇味, 得黄酮粗提物。将粗提物溶于适量纯水, 样品溶液倒入硅胶层析柱, 依次用纯水、30% 乙醇洗脱杂质, 最后用 70% 乙醇洗脱目标化合物, 收集洗脱液得到芦丁提取物。

### 3.2 检测条件

实验用检测设备为英国 RENISHAW 拉曼光谱仪, 设置参数: 激光激发波长: 532 nm, 激光功率:  $< 10\text{ mW}$ , 测试时间: 10 秒/次, 扫描范围 100-4000 $\text{cm}^{-1}$ 。

### 3.3 实验数据的采集及降噪处理

在仪器设置好参数的前提下, 采集空白基底的拉曼光

谱作为背景信号, 对样品表面多点采集光谱, 避免局部异质性影响, 每组样品重复测量, 确保数据稳定性。采用 3 阶多项式拟合基线, 利用软件内置功能自动识别并扣除荧光背景, 平滑去噪(Savitzky-Golay 滤波, 保留峰形特征的同时抑制噪声)。

样品的拉曼光谱信号采集: 将制备的 AuNPs 滴涂在金属基底上, 自然晾干后形成均匀薄膜, 再移取蒺藜提取物(去氢骆驼蓬碱、芦丁) 10  $\mu\text{L}$  样品溶液滴加于基底表面, 室温干燥后形成均匀吸附层, 检测其拉曼光谱信号。

## 4 实验结果

### 4.1 样品加 AuNPs 对拉曼光谱信号强度的影响

#### 4.1.1 蒺藜中去氢骆驼蓬碱和样品加 AuNPs 的 SERS 光谱图

蒺藜中去氢骆驼蓬碱的拉曼光谱图特征分析: 如图 1 所示, 在 670  $\text{cm}^{-1}$  和 871  $\text{cm}^{-1}$  处, 标准品在此处对应生物碱分子中环的扭曲振动(如五元环或六元环的骨架振动), 或含氧/硫官能团(如 C-O-C、C-S 键)而样品在此处的峰强度显著高于标准品, 可能提示样品中存在杂质(如残留溶剂或未纯化的中间体), 在 1342  $\text{cm}^{-1}$  处, 标准品与 C-N 伸缩振动(如叔胺基团)或芳香环的变形振动相关, 而样品强度减弱, 表明生物碱部分降解或官能团被修饰(如氧化), 在 1569  $\text{cm}^{-1}$  和 1627  $\text{cm}^{-1}$  处标准品在 1569  $\text{cm}^{-1}$  处有典型芳香环 C=C 伸缩振动(如吡啶或异喹啉类生物碱)。在 1627  $\text{cm}^{-1}$  处可能为共轭双键(C=O 或 C=N)的振动, 或芳香环的对称振动增强, 样品在 1627  $\text{cm}^{-1}$  峰显著增强, 可能存在氧化产物(如酮基生成)<sup>[17]</sup>。

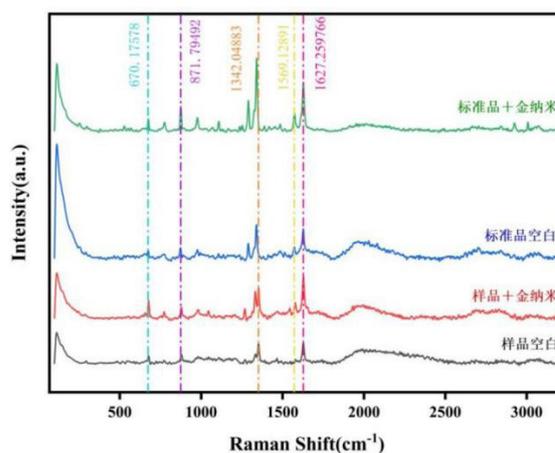


图 1 标准品去氢骆驼蓬碱与蒺藜提取物样品加 AuNPs 后的拉曼光谱图

根据以上结果可以看出峰匹配度高且强度比例相似, 样品与标准品成分基本一致, 而 AuNPs 可有效地放大弱的拉曼光谱信号强度。

#### 4.1.2 蒺藜中芦丁和样品加 AuNPs 的 SERS 光谱图

如图 2 所示, 标准品在 1855  $\text{cm}^{-1}$  和 1995  $\text{cm}^{-1}$  对应芳

香环的 C=C 伸缩振动或共轭双键 (C=O) 的振动, 常见于黄酮骨架, 在  $2288\text{ cm}^{-1}$  是 C≡或 C≡C 振动, 在  $2700\text{ cm}^{-1}$  可能与 O-H 伸缩振动 (如糖苷中的羟基) 或 C-H 振动 (脂肪链或甲氧基) 相关, 在  $2963\text{ cm}^{-1}$  为典型 C-H 不对称伸缩振动 (如 -CH<sub>3</sub>、-CH<sub>2</sub> 基团), 常见于芦丁糖苷部分的甲基或亚甲基, 而样品同上, 与标准品高度相似。实验结果表明出峰位匹配度高且强度比例相似, 样品与标准品成分基本一致, 由图可见 AuNPs 可有效地放大拉曼光谱信号强度。

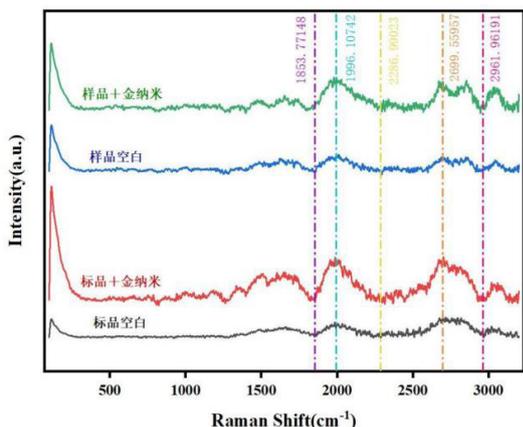


图 2 标准品芦丁与蒺藜提取物样品加 AuNPs 拉曼光谱图

#### 4.2 不同金属基底溅射 AuNPs 对拉曼光谱信号强度的影响

表面增强拉曼散射 (SERS) 技术的灵敏度和信号重现性高度依赖于基底的材料特性与纳米结构设计。基底作为 SERS 活性平台的物理载体, 不同的基底材料可能导致信号增强幅度呈现显著区别, 实验采用 4 种不同的基底 (不锈钢, 锌, 钛, 铝、硅片) 进行 SERS 增强效果的对比, 结果如下。

##### 4.2.1 去氢骆驼蓬碱标准品在不同金属基底增强效果

如图 3 所示, 标品以金纳米 / 钛为基底信号增强效果最佳, 锌 / 铝 / 不锈钢为基底增强较弱; 故对于去氢骆驼蓬碱标准品, 金纳米基底和钛金属基底拉曼信号增强效果为最佳。

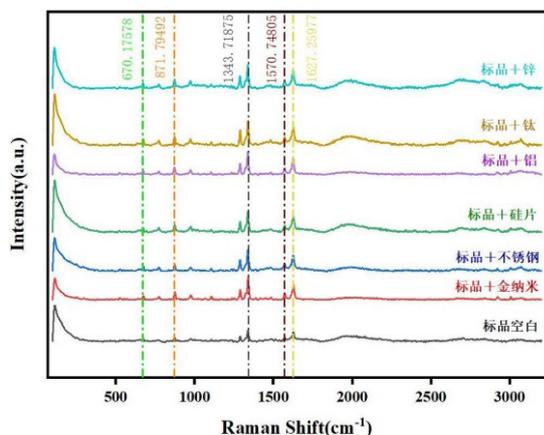


图 3 去氢骆驼峰碱标准品与各基底拉曼光谱图

##### 4.2.2 芦丁标准品在不同金属基底增强效果

如图 4 所示, 样品以金纳米 / 钛 / 锌基底信号显著增强, 不锈钢 / 硅片 / 铝基底微弱增强, 故对于芦丁标准品, 金纳米基底 / 钛基底 / 锌基底拉曼信号增效果最好。

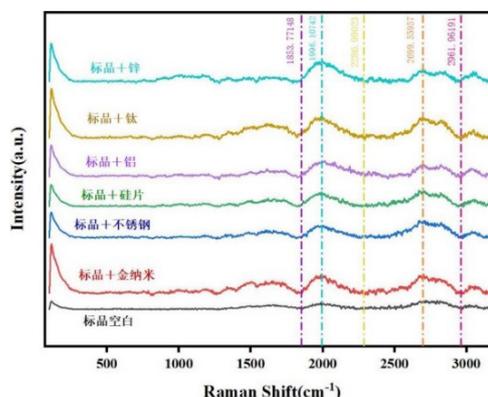


图 4 芦丁标准品与各基底拉曼光谱图

## 5 结语

本研究首次将 SERS 技术与蒺藜活性成分分析相结合, 实现对蒺藜成分的高灵敏度、快速检测。

实验首先提取了蒺藜药材中的生物碱中的去氢骆驼蓬碱和黄酮类化合物芦丁; 其次使用氧化还原法使 H<sub>2</sub>AuCl<sub>4</sub> 溶液与柠檬酸钠溶液反应制备得到 AuNPs, 然后将金纳米粒子滴至洁净金属表面形成均匀金属纳米基底以作对比。检测其拉曼光谱信号后采用基线校正、平滑滤波 (Savitzky-Golay 算法) 处理拉曼光谱数据, 实验结果表明, 在金属基底上滴涂 AuNPs 使拉曼光谱信号强度显著增加: 对于芦丁标准品及蒺藜提取物, 以金纳米为基底或部分金属为基底的增强效果为最佳, 本实验所建立的 SERS 方法可为进一步实现中药材蒺藜活性成分的快速检测提供研究基础。

## 参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 2020 年版一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [2] 侯爽, 陈长君, 杨博等. 蒺藜成分及主要药理作用研究进展[J]. 中国医药导报, 2014, 11(35): 156-159.
- [3] 朱景岩. 蒺藜对心脑血管系统的药理作用及其临床应用[J]. 中国民族医药杂志, 2010, 10: 77-78.
- [4] 李红, 王秀华, 崔佳乐等. 注射用蒺藜皂苷的抗血栓形成作用[J]. 吉林大学学报, 2005, 31(1): 14-16.
- [5] 孙斌, 翟伟菁, 柏忠江. 蒺藜皂苷对乳腺癌细胞Bcap-3的体外抑制作用[J]. 中药材, 2003, 26(2): 104-106.
- [6] 王如意, 陈光, 喻长远. 白蒺藜果实的化学成分研究[J]. 北京化工大学学报, 2009, 36: 79-82.
- [7] 徐丽君, 黄光英. 中药蒺藜的皂苷类成分及主要药理作用研究概述[J]. 中西医结合研究, 2009, 2(1): 102-104.
- [8] 金京玲, 金哲洙, 任东鲜, 等. 刺蒺藜果实中两种甾体皂苷的分离与鉴定[J]. 中草药, 2000, (02): 12-13.

# Research on Reliability Testing Methods and Result Evaluation of Electronic Components

Minghui Xue Peng Zhang

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

## Abstract

The reliability of electronic components directly affects the service life and failure probability distribution of the entire system. Traditional testing methods have significant limitations in simulating extreme working conditions and tracing failure mechanisms. This study takes the application of HX-2024 series surface mount resistors in the electronic control system of new energy vehicles as the research object. A multidimensional test system integrating environmental adaptability, electrical durability, and failure mode analysis was established. The accurate prediction of failure time and quantitative evaluation of reliability indicators were completed using multi parameter real-time monitoring and Weibull distribution model fitting methods. From the test results, it can be seen that when the temperature cycle reaches the critical value, a significant failure concentration phenomenon appeared in this batch of samples, providing data support for component selection optimization and system level reliability prediction.

## Keywords

electronic components; Reliability testing; Failure Mode Analysis; Weibull distribution; quantitative evaluation

# 电子元器件可靠性试验方法及结果评估研究

薛明辉 张鹏

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

## 摘要

电子元器件的可靠性直接影响着整机系统的服役寿命和故障概率分布, 传统试验方法在极端工况模拟以及失效机理溯源上存在很大局限性。本研究以HX-2024系列贴片电阻在新能源汽车电控系统中的应用为研究对象, 建立了环境适应性、电气耐久性、失效模式分析为一体的多维试验体系, 用多参数实时监测、威布尔分布模型拟合的方法完成了失效时间的准确预测、可靠性指标的量化评估, 从试验结果可知, 在温度循环达到临界值的时候, 该批次样品就出现了明显的失效集中现象, 为元器件选型优化和系统级可靠性预测提供数据支持。

## 关键词

电子元器件; 可靠性试验; 失效模式分析; 威布尔分布; 量化评估

## 1 引言

电子元器件是电子系统最基本的组成单元, 电子元器件的可靠性水平微小的波动, 都会在系统层面被逐级放大, 最终演变成难以预判的整机故障, 从微观失效到宏观崩溃的传递链条在航空航天、轨道交通、新能源汽车等领域尤其致命。目前工业界常用的加速寿命试验虽然可以在较短时间内暴露潜在缺陷, 但是由于加速因子选择具有经验性、失效机理映射模糊等不足而受到质疑, 实验室中获得的失效数据能否真实地反映实际服役环境中的退化轨迹, 至今还没有得到令人满意的答案。

【作者简介】薛明辉(1992—), 男, 中国陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

## 2 可靠性试验类型与方法设计

### 2.1 环境适应性试验(温湿度、振动等)

环境应力对电子元器件的侵蚀具有高度的非线性特征, 单一应力的独立作用很难复现实际服役中复杂的退化行为, 温度梯度引起的热机械疲劳、湿度渗透引起的电化学腐蚀、振动激励引起的机械断裂相互耦合、相互催化, 形成远大于线性叠加的协同破坏效应<sup>[1]</sup>。HX2024系列样本的环境适应性试验采用的是三轴向综合应力加载方案, 温度循环范围从-40摄氏度到125摄氏度, 升降温速率控制目的是充分激发发热冲击效应, 湿度条件保持在高湿状态并叠加随机振动谱, 这一参数组合来源于整车级路谱数据的统计分析, 比单纯按照标准规范设定的试验条件更具有工况代表性。试验过程中发现, 当温度循环累积到一定次数的时候, 首批样本的绝缘电阻出现了超出常规波动范围的异常跃变, 而在传统的单因素试验中从来没有出现过这样的情况, 说明多应力耦合

确实可以激活一些隐蔽的失效前兆。

## 2.2 电气性能耐久性试验

电气性能的长期稳定性是元器件可靠性评价的主要方面，阻值漂移、绝缘劣化和脉冲耐受能力衰退都会造成电路功能的逐渐失效，这类软失效由于其隐蔽性往往比硬失效更具有破坏性。对于 HX-2024 系列贴片电阻，电气耐久性试验主要是对持续负载条件下阻值的稳定性、瞬态过压耐受阈值进行试验，持续负载试验采用额定功率的 110% 应力水平连续加载，定时采集阻值数据并计算相对漂移量；瞬态过压试验采用标准雷击波形，电压峰值从额定值逐级增加，每级施加多次脉冲后检测样本的电气完整性。数据表明，在持续负载到中后期的时候，批次编号为 HX-2024-Q3-B07 的样本组平均阻值漂移已经接近设计容差的上边界，在同批次在瞬态过压达到临界水平的时候出现了第一例击穿失效，失效样本的显微切片分析表明，电极和基体界面处存在明显的金属迁移痕迹，这个微观证据给后面失效机理建模提供重要线索<sup>[2]</sup>。

## 2.3 失效模式与影响分析 (FMEA)

失效模式与影响分析属于前馈式风险识别手段，它把分散的失效现象规整成结构化的因果网络，进而给试验方案改良和设计改良赋予决策支撑。HX2024 系列 FMEA 根据前面试验中暴露出的失效样本展开，共识别出多种主要失效模式，按严酷度与发生概率的乘积排序后电极脱落和基体开裂排在前面，这两类机械性失效与温度循环应力有很强的相关性，而阻值漂移超差这类电气性失效与持续负载时长有更强的线性关系。

# 3 试验数据采集与处理技术

## 3.1 多参数实时监测系统搭建

可靠性试验数据的质量好坏直接影响后面分析的可信度，传统的离线监测模式由于采样间隔过大而容易忽略瞬态异常事件，实时监测系统可以提高时间分辨率来记录失效演化全过程动态。监测系统包含阻值、绝缘电阻、温度、振动加速度这四种传感通道，采样频率的设置要兼顾数据量与信息密度之间的矛盾，所有的通道数据通过工业以太网实时上传到上位机，并用时间戳同步存储，在系统长期运行中没有出现数据丢失或者时钟漂移的情况。监测系统另一项重要的功能就是异常事件的在线预警，对各个通道设置动态阈值，并采用滑动窗口统计的方式，当参数瞬时值偏离均值超过设定倍数的标准差时，就会触发告警并自动标记该时段的数据<sup>[3]</sup>。

## 3.2 试验数据预处理与异常值剔除

原始监测数据不可避免地带有传感器噪声、通信干扰、偶发性毛刺等噪声，如果不加以筛选就直接进行统计分析，将会严重歪曲可靠性评估的结论。数据预处理流程包含缺失值插补、去趋势化、异常值剔除三个步骤，缺失值用局部加权回归进行插补来保持时序的连续性，去趋势化通过高通滤波消除温度漂移等慢变因素的影响，异常值剔除使用改进的

格拉布斯准则，将判定阈值设为样本标准差的某个倍数。经过预处理后有效数据量比原始数据少了一些，剔除的异常点经过人工复核后，绝大多数都是由于传感器接触不良或者供电波动，少数和真实失效前兆有关而被单独标记出来用于后续机理分析。

## 3.3 可靠性统计分布模型拟合

失效时间的统计分布特征是可靠性评价的数学基础，由于威布尔分布具有形状参数灵活的特点，所以它成为电子元器件寿命建模的首选工具，形状参数小于某个临界值时表明早期失效占主导，等于临界值时为随机失效，大于临界值时为耗损失效<sup>[4]</sup>。HX-2024 系列样本的失效时间数据用最大似然估计拟合后，形状参数和尺度参数的取值表明该批次元器件已经过了早期失效期，进入稳定的随机失效期，这一结论与样本的筛选工艺记录相吻合，即出厂前已经做了高温老化剔除早期缺陷品。拟合优度检验用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫方法，统计量表明威布尔分布假设在常规置信水平下不能被拒绝，模型的预测精度满足工程应用要求。

## 3.4 失效时间与失效率数据分析

失效率是可靠性评价的主要指标，它随时间变化的曲线，即著名的“浴盆曲线”，形象地描绘了元器件整个生命周期的失效规律。HX2024 系列瞬时失效率曲线呈现出典型的三阶段形态，早期失效率的快速下降是由于筛选工艺把缺陷品剔除了，中期失效率的平稳低位对应的是随机失效的稳态区间，后期失效率的加速攀升预示着耗损失效机制的启动。

# 4 结果评估体系与工程应用

## 4.1 可靠性指标量化评估方法

可靠性指标的量化，就是将试验数据转化为工程决策依据的过程，平均失效前时间 MTTF、失效率  $\lambda$ 、可靠度函数  $R(t)$  是基本的可靠性指标。HX-2024 系列 MTTF 用威布尔分布参数计算得出，该数值远大于设计规范的下限要求，说明批次质量较好；特定置信水平下可靠度下限为系统级可靠性分配提供输入参数，避免了用点估计值直接代入计算所造成的过度乐观偏差。在指标量化过程中，还加入了加速因子的修正，把试验应力条件下的失效数据外推到实际服役应力水平，修正系数的确定依据是阿伦尼乌斯模型和逆幂律模型的联合拟合结果。

贝叶斯估计方法的加入，克服了小样本条件下经典频率学派方法置信区间过宽的缺点。通过将历史批次的先验信息和当前试验的似然函数结合起来，后验分布就可以给出更加精确的参数估计值，当样本量受成本限制不能增加时，该优势更加明显。另外 Bootstrap 重抽样技术用来检验估计量的稳定性，一千次迭代的结果表明形状参数  $\beta$  的变异系数在可接受的范围内，说明参数估计是可靠的。不确定性传递分析用蒙特卡洛模拟的方法，把输入参数的分布特性传送到

可靠度预测结果中,最后得到以概率密度形式呈现的可靠度区间,而不是单一数值,给风险决策提供更多的信息维度<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 试验结果与设计规范的符合性分析

试验结果与设计规范的比对是判定元器件是否合格的最终裁决环节,符合性分析不能只看指标数值是否在允许区间内,还要看失效模式是否偏离预期类型。HX-2024系列各项可靠性指标均满足或超过设计规范要求,但是FMEA中识别出的复合失效模式没有被现行规范所覆盖,这说明标准体系滞后于工程实践的固有缺陷,因此在试验报告中专门增加对这种失效模式的补充测试建议,推动规范条款的迭代更新。

符合性判定流程采取分层递进的逻辑架构,第一层级是强制性指标的门槛筛选,只要有一项不达标就实行一票否决,第二层级是推荐性指标的综合评分,按照层次分析法确定各个指标的权重系数之后进行加权得分,第三层级是边界条件下的敏感性审查,考察服役环境参数在允许范围内波动时指标是否仍然可以保持合格。对处于临界区域的样本用灰色关联度的方法进行符合性分析,用实测数据序列和标准规范序列之间的关联系数来判定偏离程度,避免简单二值化判定造成的信息损失。

#### 4.3 元器件选型与系统级可靠性预测

元器件选型决策要实现性能、成本、可靠性三者之间的平衡,试验数据给这种权衡赋予了量化支撑。HX-2024系列和HY-2024系列的对比显示,前者高温耐受性好,后者在振动环境下更好,根据实际服役工况的应力谱分析,BMS模块所在位置的温度应力权重大于振动应力,因此选择天平为HX-2024系列。系统级可靠性预测采用应力强度干涉模型,把元器件级失效率通过可靠性框图向上卷积到模块级、整机级,预测整车在质保期内电控系统的失效概率可以控制在设定目标之内。

选型决策矩阵的建立还要考虑供应链风险和技术成熟度等非技术因素。利用多准则决策分析模型,把可靠性试验数据、供应商审核评分、历史故障反馈、成本效益比等各方面信息融合起来,得到综合排序结果来支持最终决策。系统级可靠性预测中,共因失效的建模是不可忽视的环节, $\beta$ 因子模型被用于量化同批次元器件因制造缺陷或环境应力而发生相关失效的概率,该修正项的引入使系统级失效率估

计较独立失效假设下的结果上浮了一定比例,更加贴近实际运行状况。

#### 4.4 可靠性改进建议与试验标准优化

试验过程中暴露出来的薄弱环节给元器件设计改进指明了方向,电极和基体界面的金属迁移现象提示要改进阻挡层工艺,绝缘层微裂纹的萌生则指向基体材料配方的调整。现行规范中的单因素应力加载标准,需要补充多应力耦合方案,异常值剔除的判定标准,也应当由固定阈值变为自适应阈值,以便于适应不同的样本离散性,这些建议已经提交给了行业标准化委员会,供其修订。

设计改进措施的优先级排序按照风险优先数RPN的量化逻辑,把失效严酷度、发生频度和可探测度三者相乘得到综合评分,评分排在前面的改进项得到资源倾斜。金属迁移问题改进方案为,阻挡层材料升级、界面粗糙度控制、工作电流密度限值重新标定;微裂纹问题改进方案为,在基体材料中添加增韧相颗粒提高断裂韧性,优化烧结温度曲线减小残余热应力。试验标准优化路径用PDCA循环持续改进的理念进行,在标准修订稿发出之前安排验证性试验评价新条款的操作性和有效性。

### 5 结语

电子元器件可靠性试验的价值不仅在筛选缺陷品和验证设计余量上,更在于对失效机理的深入挖掘以推动产品迭代与标准进步,HX-2024系列试验实践表明,多应力耦合条件下失效行为比单因素实验更能体现出来,只有不断完善试验方法与评价体系才能接近可靠性工程最终的目标,即让失效可预测、可预防、可控制。

#### 参考文献

- [1] 魏莎莎,李真. 电子元器件可靠性试验方法研究[J].环境技术,2023,41(08):36-38+43.
- [2] 罗雨薇,李晓红. 电子元器件质量与可靠性技术及其研究进展[J].电子产品可靠性与环境试验,2021,39(06):84-91.
- [3] 杨喜存,惠好鹏. 电子元器件可靠性与产品故障关系研究[J].环境技术,2020,(S1):42-44+55.
- [4] 吴俊. 电子元器件可靠性试验[J].电子技术与软件工程,2020,(23):89-90.
- [5] 强苗. 探究电子元器件的失效模型与可靠性试验方法[J].电子世界,2019,(16):76-77.

# Research on the Optimization of Electronic Component Inspection Processes for Engineering Applications

Kexin Guo Xingru Li

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

## Abstract

Based on actual engineering requirements, this paper systematically reviews the key steps and operating mechanisms of the existing electronic component testing process, and finds that there are significant deficiencies in demand forecasting, grading standards, execution efficiency, and traceability in the current process. These issues not only affect the accuracy of the detection results, but also constrain the collaborative efficiency of the overall production organization. To this end, this article focuses on the problem and constructs an optimized architecture that covers the entire process. Improvement plans are proposed from four key dimensions: risk assessment and demand prediction before procurement, refinement of detection and grading strategies, standardization and automation of detection execution, improvement of data management system, and establishment of a traceability mechanism throughout the entire process. By deeply integrating organizational management, technical means, and institutional norms, the quality and efficiency of inspection processes can be improved and closed-loop management can be achieved, providing a more reliable and efficient electronic component quality assurance system for engineering applications.

## Keywords

electronic components; Engineering applications; Testing process; Process optimization; quality control

## 面向工程应用的电子元器件检测流程优化研究

郭可欣 李星儒

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

## 摘要

以实际工程需求为导向, 对现有电子元件测试流程的关键步骤与运行机制进行系统梳理, 发现当前流程在需求预测、分级标准、执行效率以及可追溯性等方面存在明显不足。这些问题不仅影响检测结果的准确性, 也制约了整体生产组织的协同效率。为此, 本文以问题为中心, 构建覆盖全流程的优化架构, 从采购前的风险评估与需求预判、检测分级策略的精细化制定、检测执行环节的标准化与自动化提升、数据管理体系的完善以及全过程可追溯机制的建立等四个关键维度提出改进方案。通过将组织管理、技术手段与制度规范深度融合, 实现检验流程的提质增效与闭环管理, 为工程应用提供更加可靠、高效的电子元件质量保障体系。

## 关键词

电子元器件; 工程应用; 检测流程; 流程优化; 质量管控

## 1 引言

国内已经建立了一套完整的测试过程系统, 但是由于测试技术、管理模式和人员素质等多种原因, 目前的测试过程还不能很好地满足实际需要。目前部分施工企业仍采用常规的测试方式, 缺少对购买阶段进行预先判断, 测试等级不明确造成了大量的资源浪费, 测试执行时操作不规范, 设备利用率低, 数据管理混乱, 难以溯源, 严重影响了测试工作的效率, 造成项目的质量风险遗漏, 从而影响整个项目的可

靠性。由于工程的复杂性和元件的工艺水平的不断提高, 常规的测试方法已经很难满足高效率、高精度和闭环的品质控制要求。

## 2 面向工程应用的电子元器件检测流程现状与问题分析

### 2.1 现有检测流程梳理

采购部门在购买过程中的工作重点是按照工程要求, 制订出一份采购清单, 对供应商进行挑选。对价格和供货时间等方面的要求比较高, 没有充分地考虑供应商的资质、元器件的适配性和质量稳定性等方面的预评价, 直到收货之后, 才开始进行测试, 这就造成了一些质量问题很难事先避免。在入库过程中只简单地检查了一下元器件的数量、规格

【作者简介】郭可欣(1998—), 女, 中国陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

和外观，并没有进行预先的预先预测和分级管理，全部部件都要在下一步的测试中进行，这会导致测试的工作量和资源的浪费。

检测执行是项目的关键，大部分项目都是以“全检为主，抽检为辅”的方式进行的，主要包括外观检查、性能参数测试和环境适应性测试等。现有检测方法主要依靠人工经验或统一的规范进行，缺少针对不同类型和应用场景的分层检测方法，导致核心部件检测精度不足和常规部件检测资源的浪费。测试仪器的调配和利用也缺少一个整体的计划，各个测试项目没有进行有效的连接，并且还出现了一些设备空闲和排队等候的情况，使得测试的效率很低。

## 2.2 检测流程核心问题诊断

采购部门在进货之前没有提前预测，对风险的控制很消极。在采购和检测过程中，由于缺少与检测、工程设计等部门之间的协调与交流，导致在选型和筛选供应商时，没有形成事前预测机制。目前对其质量控制主要限于资格审查，缺少对其生产过程、质量控制体系、过往供货质量等方面的动态评价；由于缺乏对元件适应性的预测，没有充分考虑到实际使用中的环境条件和运行要求，预先对元件的适应性进行评价，造成一些元件虽然达到了一般的规范，但是却不能适应特定的工程环境要求，即使通过了测试也会发生失效，从而加大了项目的返工费用和工程风险。在产品入库之前，没有对产品进行归类 and 预测，使产品全部进入产品测试过程，造成了大量的测试资源在低价值和非核心部件上的浪费，对核心部件的测试资源造成了严重的浪费<sup>[1]</sup>。

# 3 面向工程应用的电子元器件检测流程优化方案设计

## 3.1 检测流程整体优化框架设计

以“以项目需求为导向，质量控制为核心，提高效率”为目的，突破部门之间的界限，在采购、测试、设计和生产等多个部门之间建立起多个协作的体系，把检测控制放在采购阶段，从而达到预先防范风险的目的。采用科学的分类测试战略，最大限度地提高测试的准确性和有效性；以数字科技为基础，对检验的执行过程进行了优化，使检验过程标准，提高了检验的自动化程度；建立一个数据管理平台，将测试数据、采购数据和应用数据进行相关集成和跟踪；通过支持的保证和持续的改善机制，保证了优化过程的实施和改善。

## 3.2 各环节优化方案细则

### 3.2.1 采购入库前预判环节优化

“协同预测-动态评价”是前期的品质控制，预先防范和匹配风险，构建一个由采购、测试、工程设计、生产四个部门共同参与的多部门协作预测团队，将各个部门的责任划分清楚：设计部负责将零部件的技术参数、工程适配要求、环境运行要求等关键资料给出；检验单位制订预报准则和检验重点；采购部根据预测的结果对零部件的型号进行选择；

产品部对零部件的使用进行反馈。改进供应商评价体系，将评价维度由“资质”、“质量”、“产能”、“服务”、“口碑”等五个方面，构建“供应商档案”，对其生产工艺、质量管控体系、过往供货质量、售后服务能力等进行综合评价，并实施“进入-评价-淘汰”的动态管理体系。与高质量的供货商进行长期的协作，将品质不稳定和服务不到位的供货商予以清除，以保证零部件的质量。需要供货商向其提交部件的质量测试报告，兼容性证明，环境适应性试验数据等信息，以便提前预判<sup>[2]</sup>。

### 3.2.2 检测分级策略优化

一级检测（核心元器件）：项目核心工作部件（核心芯片、传感器、控制器等）的性能好坏将影响整个项目的运行稳定。检测内容除常规外观和性能参数检测外，还新增了对高低温、高湿度、振动测试、可靠性测试（寿命测试、疲劳测试）、兼容性测试（与其它部件及系统的兼容性测试），对检测的准确性和规范性进行了严密的管控，以保证关键部件的品质不会出现安全问题。并对检验资料实行二次复查，以防止资料错误<sup>[3]</sup>。

二级检测（重要元器件）：对于项目中的重要部件（功率模块、继电器和连接器等），采取了抽样检查+集中检查的方式。根据元器件批次和供应商品质等级，对风险等级进行预测，对批量大、供应商品质稳定、预测风险小的元器件进行抽样检测，抽查的比重不超过5%-10%；批量小，供应商品质一般，预计风险高的零部件，抽查的比重提高到15-20%。检测内容包括外观质量、主要性能指标和稳定性检验等，以保证产品符合实际使用要求。如有不合格产品，应及时加大抽查的比率，以排除存在的问题。

### 3.2.3 检测实施环节优化

搭建测试装备综合管理平台，实现对各种测试装备的运行状况、测试能力和闲置状态的监测和调度。通过对探测任务的优先级和设备性能的分析，对探测任务进行了优化配置，消除了设备的空闲和排队现象。如为三阶段测试工作配置了自动测试仪器，以提高测试速度；为保证测试的准确性，采用了高精密的测试仪器。建立设备的日常维修和校准机制，制订维修和校准方案，对测试设备进行周期性的检修和校准，保证设备工作的稳定性，降低由于设备失效而造成的测试延迟和测量错误。对精度差的设备进行改造，引进自动化和智能化的测试设备，提高测试的自动化程度。对测试执行过程进行重组，去除过程中的多余部分，使各个部分之间的联系更加紧密。采取“一站式采样，分段检测，集中复核”的方式，在完成了统一采样后，按照不同等级的检测需要，将元件划分到相应的检测范围内，以防止多次采样；实现了多个检验项目的信息共享，避免了多个检验项目的重复输入，提高了检验工作的效率。如在产品的外观检验通过之后，测试资料可以与产品的性能测试部分进行同步，而不需要再做任何的录入。开通“检测异常”绿色通道，一旦在测

试中出现任何不正常现象,将会立刻中止测试,并有专门的专家进行分析和解决,以免耽误整个测试的进程<sup>[4]</sup>。

编制了相应的等级测试操作规程,对不同等级和种类的元器件进行测试,对测试的标准,操作程序,数据记录等进行了详细的规定。强化对操作工人的业务训练,对新元器件测试技术,设备操作,操作规程等进行经常性的培训,通过考试后才能进入岗位。对运行管理工作实行专人管理,确定每个工作岗位的具体责任,并对试验数据的真实性和准确性负责。引进了对检测过程中的重要部分实施视频监测的实时监测,对不符合要求的作业方式进行及时的检测和改正,保证测试过程的合规和结果的可靠性。

### 3.2.4 数据管理与追溯环节优化

该系统包含了输入,存储,查询,分析和追溯,该系统采取了自动收集和手工辅助相结合的方法,将测试装置组成网络,实现测试资料的自动收集,降低了人为输入的错误;对于不能自行收集的资料(例如供应商评定结果、预测意见、异常处理等),必须有专门人员进行记录,以保证资料的完整性。为了保证数据的安全,在使用云计算和局部备份的基础上,对数据进行了规范和规范。通过对元器件型号、厂商、测试时间、测试人员和测试结果的多维检索,提高了对测试结果的检索效率。通过对测试结果的分析,形成质量趋势报告、供应商品质评价报告、检测效能分析报告等,为生产过程优化、采购决策和质量改进提供依据。对每一批次、每个核心部件都赋予一个独一无二的可溯源代码,其中包括供应商信息、采购时间、预估结果、测试数据、测试人员、应用场景、维修记录等重要信息,从而达到“一物一码”的可溯源性。一旦发生了品质问题,就可以利用可溯源代码,迅速地查找到零部件的采购渠道、检验流程和使用环节等相关资料,从而准确地找到问题的根本原因,并对其进行及时的召回、更换和整改。对项目运营过程中可追踪部件的性能进行追踪,为检测标准调整和供应商筛选提供参考,从而实现“检测-使用-反馈-优化”的闭环机理。

### 3.3 配套保障措施设计

成立一个以公司主要负责人为首,采购、检测、设计、生产、运维等部门的负责人参加的跨部门协调工作团队,将

各个部门在优化过程中的责任和划分清楚,增强部门之间的交流和合作,打通工作屏障。成立检验程序优化专门小组,对检验程序进行落地执行,跟踪进度,发现问题,不断改善,并组织现场工作例会,及时处理在执行中遇到的问题。对测试部的结构进行了进一步的调整,增加了技术研发和数据管理的岗位,加强了测试技术的研发和数据管理的力度,为整个过程的优化提供了一个强有力的组织支持。增加检测的工艺和设备,引进自动化和智能化的检测设备(例如自动化的光学检测设备、高精度的性能测试仪和云计算的数据管理系统),提高检测的自动化和数字化水平<sup>[5]</sup>。完善检测流程管理制度,制定《电子元器件分级检测规范》《检测数据管理办法》《供应商动态评估制度》《检测人员岗位责任制》等一系列规章制度,明确流程执行标准、质量责任划分、考核激励机制,规范各环节工作行为。

## 4 结语

通过多个部门的协作预测,可以提前进行危险的预防,通过分层的测试战略来进行资源的分配,在测试的执行过程中,可以提高测试的效率和准确性,利用数字可追踪系统进行整个寿命周期的控制,准确地适应电子元器件的质量、效率和成本等方面的需求。通过本项目的研究,提高我国电子元件测试工作的科学效率和效率,同时也可以为工程采购决策、设计优化和生产运营提供支持,从而提高整个工程行业的质量管理能力。

## 参考文献

- [1] 史安旗,张欣,陈世超,等. 基于改进YOLOv8n和ByteTrack的电子元器件分拣多目标跟踪算法研究[J]. 智能感知工程,2025,2(04): 48-59.
- [2] 李少杉,成建宏,张钊,等. 基于改进反向蒸馏网络的电子元器件表面缺陷检测[J]. 数据采集与处理,2025,40(06):1581-1595.
- [3] 于文刚,任小博,任庆吉,等. 论电子元器件低频电噪声缺陷检测技术[J]. 电子元器件与信息技术,2025,9(04):73-76.
- [4] 贾邦奇,王野,王娇,等. 基于电子元器件检测的数据管理平台设计与研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2025,43(04):56-61.
- [5] 张文瑞,谢思映,张钊,等. 试论电子元器件缺陷智能检测方法[J]. 中国设备工程,2025,(14):195-197.

# Energy Efficiency Evaluation and Energy Saving Potential Analysis of Power Plant

Gang Wang

Gansu Electric Power Investment Changle Power Generation Co., Ltd., Jiuquan, Gansu, 735200, China

## Abstract

This study investigates the development of an energy efficiency evaluation framework for power plants, explores in-depth energy-saving potential, and proposes corresponding policy recommendations and implementation measures. First, a comprehensive evaluation system is established, incorporating key indicators such as power generation efficiency, fuel consumption rate, plant electricity consumption rate, and emission control levels, to provide a scientific basis for energy efficiency assessment. Second, the energy-saving potential of power plants is analyzed from three dimensions: technological upgrades, operational management optimization, and clean energy utilization, with specific improvement strategies proposed. Finally, from a policy perspective, recommendations are made to enhance policy support and incentives, as well as improve the regulatory and standardization system, to promote the in-depth development of energy efficiency improvement initiatives in power plants.

## Keywords

power plant energy efficiency evaluation; energy saving potential; technical transformation; operation management optimization

## 电厂能效评估与节能潜力分析

王刚

甘肃电投常乐发电有限责任公司，中国·甘肃 酒泉 735200

## 摘要

本文旨在探讨电厂能效评估体系的构建、节能潜力的深度挖掘以及相应的政策建议与措施。首先，通过构建包括发电效率、燃料消耗率、厂用电率及排放物控制水平等关键指标的全面评估体系，为电厂能效评估提供科学依据。其次，从技术改造、运行管理优化及清洁能源与综合利用三个维度深入分析了电厂的节能潜力，并提出了具体的提升策略。最后，从政策层面出发，提出了加大政策支持与激励、完善法规标准体系等建议，以促进电厂能效提升工作的深入开展。

## 关键词

电厂能效评估；节能潜力；技术改造；运行管理优化

## 1 引言

随着全球能源需求的持续增长和环境保护意识的日益增强，提高能源利用效率、减少能源消耗及碳排放已成为电力行业发展的重要课题。电厂作为能源消耗大户，其能效水平直接关系到国家能源安全和环境保护目标的实现。因此，开展电厂能效评估与节能潜力分析，对于指导电厂优化运行、促进节能减排具有重要意义。

## 2 电厂能效评估体系构建

### 2.1 评估指标选取

电厂能效评估指标的选择需综合考虑技术先进性、经济合理性及环境友好性。发电效率作为最直接反映能源转换效率的指标，是衡量电厂能效水平的核心。燃料消耗率则直

接关联到电厂的运营成本和环境影响，是评估其资源利用效率的关键指标。此外，厂用电率作为评价电厂内部能源管理效率的重要参数，也是不容忽视的。同时，随着环保法规的日益严格，排放物控制水平成为衡量电厂环境友好性的重要标准，包括二氧化硫、氮氧化物及颗粒物等污染物的排放量均需纳入评估范围。

### 2.2 数据采集与处理

在电厂能效评估中，数据采集与处理的准确性至关重要。电厂需构建一套高效、全面的数据采集系统，实时追踪锅炉、汽轮机、发电机等核心设备的运行状况，确保数据获取的及时性和全面性。面对复杂多变的数据环境，采用先进的数据清洗技术是关键，它能有效剔除冗余、错误的数

【作者简介】王刚（1989—），男，中国甘肃定西人，本科，助理工程师，从事电力运行管理。

## 2.3 评估方法与模型

针对电厂能效评估的复杂性，需采用多种评估方法和模型相结合的方式的综合评估。数据包络分析（DEA）作为一种非参数的效率评估方法，能够有效避免主观因素的干扰，客观反映电厂的相对效率水平。多目标优化模型则能够考虑多个评估指标之间的权衡关系，为电厂在不同工况下制定最优运行策略提供科学依据。此外，随着人工智能技术的发展，机器学习、深度学习等算法也被逐渐应用于电厂能效评估中，通过挖掘数据背后的隐藏规律，进一步提升评估的准确性和智能化水平。

## 3 电厂节能潜力深度挖掘与提升策略

### 3.1 聚焦核心设备节能升级

锅炉是发电厂最大的耗能设备之一，其燃烧效率直接决定了燃料消耗情况。采用高效燃烧技术如低氮燃烧器改造、优化一次风配比提升煤粉充分燃烧率等可降低炉本体热量损失 3%~5%，此外还可以应用清洁受热面技术。例如安装声波吹灰器以及汽力吹灰器等设备，可以有效减少管壁上的积灰结垢情况的发生，提高传热效果的同时节约燃煤耗损 5~8g/kW·h。对于老式的锅炉而言，可利用余热回收技术进行改造，如增设低压省煤器等设备，如此便能够将烟气余热用来预热冷却水，从而降低电场制备过程中的耗煤量，大概在 10-15g/kW·h 之间。某 300MW 等级火电机组锅炉实施了低氮燃烧器改造以及烟气余热回收利用技术改造后，上网电价从之前的 290g/kW·h 降低至目前的 272g/kW·h。年节约标准煤 8000t 左右<sup>[1]</sup>。

汽轮机效率的提高是改善发电厂经济性的重要环节之一。通过改变汽轮机通流部分的形式，并采用新型叶片以及更好的密封装置来降低漏汽损失和流动阻力损失，可使汽轮机效率提高 2%~3%，也可将发电煤耗降至 8-12g/kW·h。其次，还可以从汽轮机的热效率上进行提升，比如对抽吸参数进行调整，从而提高回热作用的效果，降低冷却能源的消耗，在这种情况下，就可以再次降低用煤量到每年节约近 1.2 万 t 标准煤的程度；对于诸如高加（HighPressureHeater）、低加（LowPressureHeater）等附属设备，可以通过堵漏增效提升传热系数的方式避免出现蒸汽泄漏的情况从而提升热量利用程度，在将某台 600MW 等级汽轮机动改通流后，其发电效率已从之前的 41% 提高到现在的 43.5%，每年可节约标煤 12000 多吨<sup>[2]</sup>。

厂用负荷约占全厂用电量的 60%~70%，节能潜力巨大。对于风机、水泵类电机可应用高压变频调速系统进行改造：在锅炉送引风机、一次风机、排粉机以及空预器吹灰器、脱硫磨煤机润滑油站循环油泵、凝结水泵、闭路水泵、循环水泵、工业废水池潜污泵、生活污水提升泵、消防泵等电机上加装变频器，因此可以根据实际的需求来及时地调节其速度，这样就能够有效地降低这些辅机所消耗的能量，使得

整个工厂的功率利用率可以提升至少 0.5-1% 左右。另外可以将传统的低效电动机更换为 IE3 及以上的高效电动机，则它们的效率可提高 3%-5%。再者降低辅机耗电量，如某电厂将四台循环水泵改造为变频调速后，单台泵年用电量由原来的 86 万 kWh 降至 52 万 kWh，可实现年节约电费约 20 万元。

### 3.2 实现全流程能效管控

根据电力系统中的耗能情况以及机器的效率特点制定最优的用电方案。对于具有多个发电机组的工厂而言，则根据每台机器的耗能率曲线特性，合理分配各台机器的工作量，让高效机承担基本负荷，低效机承担高峰负荷。避免其在非经济区间运行。同时开展“AGC 经济调频”技术应用，实现机组出力在线跟踪调整，使其始终运行在最佳经济区间内，降低厂用电率约 3 ~ 5g/kWh。如某电厂实施该技术后取得良好效果。他们将两台 300 兆瓦发电机和 600 兆瓦发电机合理搭配使用，成功地将全厂总耗电从 275 克每千瓦时降低到 268 克每千瓦时，每年可节约标煤五万吨<sup>[3]</sup>。

建立了燃烧特性试验模型并根据煤质特点（发热量、挥发分含量以及含灰量）动态优化燃烧参数；通过对投料量、一次风速、二次风配比以及喷火角度进行适当调整，优化炉内燃烧工况，降低不完全燃烧热损失及排烟热损失；借助于在线燃烧监测技术，连续监测炉温和烟气成分（O<sub>2</sub> 和 CO），并自动调节燃烧工况，以维持最理想的燃烧状态。某电厂经燃烧优化改造后，锅炉效率从原来的 92.5% 提升到了 94.2%，厂用电率降低 6g/(kW·h)，年节标煤约 3600t。

建立了全寿命的保护装置，对锅炉、汽轮机、辅机等关键设备进行周期性检修保养，避免“带病作业”，效率下降；定期清洗锅炉受热面、汽轮机通流部分，减少结垢积灰；加强密闭件、阀类的维护保养，防止蒸汽及压缩空气泄漏；不断校准仪表和传感器的数据，确保数据的准确度，以便于运行调控提供可靠基础。某电站经精细化检修之后，设备非计划停运时间缩短了 30%，机组平均利用效率提升了 2.1 个百分点，年节煤标煤约 420 吨。

### 3.3 拓展节能新路径

利用厂区闲置土地和厂房屋顶建设分布式光伏发电系统进行自产上网余电出售，替代部分外购电量，减少了对外部的消耗量；对于燃油类用能项目而言，可结合配套风电系统组成“燃油+风电+光伏+储能”的互补型系统，其中燃油机组承担基荷负荷，风电及光伏承担出力变化部分，储能用来平抑出力波动，从而提升能源供应的安全性与清洁度。如某燃油机组建成 20MW 分布式光伏电站后，年均上网电量约 2200 万 kW·h。让全厂用电率从原来的 6.2% 降至 5.5%，年节约标准煤约 700 万吨，减少二氧化碳排放量 18000 余吨。

在不断努力将余热充分利用起来，比如利用蒸汽及热水循环系统的余热进行供热或供汽，并可用于驱动吸附式制冷机为厂内空调降温，再次提升综合效率。对于一些联产电

厂而言,会改造它的热管系统,让它的供热面积更大范围的运用这些多余的热量;再者就是鼓励运用固体废物进行再生资源生产,例如燃煤后的煤渣用于生产水泥、砖石等建筑材料,经净化的CO<sub>2</sub>排放物可用于生产石膏板和石膏构配件等等,这样一来便达到了“化废为宝”的效果。某热电联产电厂在进行了余热供汽系统改造后,年供热量从150万GJ提高到目前的280万GJ,同时粉煤灰及脱硫石膏利用率提高至98%左右,节约了约300万元的固废处置成本;同时提高了能源综合利用率,由原来的45%提升至现在的58%<sup>[4]</sup>。

采用生物质锅炉助燃替代燃煤方式是将少量的生物质直接掺入到火电厂锅炉中进行燃烧,从而达到减少化石能源以及CO<sub>2</sub>消耗和排放的目的,并不需对锅炉做大的改造,在实际应用过程中较为成熟且成本较低。某电力公司采取生物质颗粒替代燃煤10%,以年消耗约2万t秸秆原料为例,则可替代标准煤1万余吨,减排CO<sub>2</sub>排放量约3万t,再加上生物质发电的电价补贴,每年增加利润近470万元。

## 4 节能潜力分析

### 4.1 技术改造潜力

技术改造是提升电厂能效的重要手段之一。随着科技的进步,许多高效、节能的新技术不断涌现,为电厂的能效提升提供了广阔的空间。首先,对电厂现有设备进行全面评估,识别出技术落后、效率低下的设备或系统,如老旧锅炉、低效汽轮机及高能耗辅机等。针对这些设备,可采取一系列技术改造措施,如引入高效燃烧技术,通过优化燃烧过程,提高燃料利用率,减少污染物排放;优化热力系统,通过改进热力循环,降低热损失,提高热能转换效率;升级辅机设备,采用高效节能的电机、泵和风机等,减少辅助系统的能耗。这些技术改造措施的实施,将显著提升电厂的整体能效水平。

### 4.2 运行管理优化

在电厂的运行管理中,挖掘节能潜力是提升能效的关键环节。通过实施精细化负荷调度策略,能够精准匹配电力需求与机组运行状态,减少不必要的负荷波动,提升机组运行的经济性和稳定性。同时,建立健全节能降耗操作规范体系,加强对操作人员的专业培训,不仅能够提升其技能水平,还能增强节能意识,从源头上减少操作失误带来的能量损耗。此外,智能运维系统的引入更是革命性的变革,它利用大数据和云计算等前沿技术,对海量运行数据进行深度挖掘与分析,实现设备故障的提前预警与快速响应,有效提升了设备的可靠性和整体运行效率。

### 4.3 清洁能源与综合利用

清洁能源的利用和能源的综合利用是电厂未来发展的重要方向。随着可再生能源技术的不断发展,火电与风电、

光伏等可再生能源的互补利用成为可能。通过建设风电、光伏等可再生能源发电项目,与火电形成互补,提高能源供应的多样性和稳定性。同时,加强对余热、余压等二次能源的回收利用,如利用锅炉排烟余热进行供暖或发电,利用汽轮机排汽余热进行海水淡化等,提高能源综合利用率,减少能源浪费。这些措施的实施,不仅有助于提升电厂的能效水平,还有助于推动能源结构的优化和环境保护的改善。

## 5 政策建议与措施

### 5.1 政策支持与激励

政府应加大对电厂能效提升项目的支持力度,通过一系列优惠政策激励电厂积极投身于节能改造之中。具体而言,可以实施税收优惠政策,对参与能效提升项目的电厂给予税收减免或优惠税率,减轻其财务负担。同时,设立专项财政补贴,对完成节能改造并达到能效标准的电厂给予一定的资金补助,增强其改造动力。此外,推动绿色金融的发展,鼓励金融机构为电厂能效提升项目提供低息贷款、绿色债券等融资支持,降低其融资成本。这些政策措施将有效降低电厂节能改造的成本和风险,为其能效提升提供有力保障。

### 5.2 法规标准完善

完善相关法规标准体系是保障电厂能效提升工作顺利进行的關鍵。政府应制定明确的能效提升目标和要求,并将其纳入法规体系之中,使电厂在节能改造过程中有法可依、有章可循。同时,建立健全能效监管机制,加强对电厂能效水平的监测和考核,确保其按照既定目标推进节能改造工作。对于未能达到能效标准的电厂,应采取相应的惩罚措施,如限制其发电量、提高排污费等,以形成有效的约束机制。通过这些措施的实施,将推动电厂积极开展能效评估与节能改造工作,为实现绿色低碳的能源发展目标贡献力量。

## 6 结语

本文深入探讨了电厂能效评估与节能潜力分析的重要性及其实施路径。通过构建全面的评估体系、挖掘技术改造与管理优化的节能潜力,以及提出政策建议与措施,为电厂能效提升提供了系统性指导。电厂能效提升不仅是技术进步的体现,更是能源结构调整和环境保护的必然要求。

### 参考文献

- [1] 李欣怡.电厂能效评估体系构建与节能潜力分析[J].能源与环境科学,2023,15(6):345-350.
- [2] 赵思远.电力系统能效电厂项目研究综述[J].电力技术经济,2022,24(2):78-83.
- [3] 陈静宜.火电厂环保设施优化及节能措施研究[J].皮革制作与环保科技,2021,13(1):45-49.
- [4] 郭浩宇.变频装置在火电厂节能降耗中的应用[J].上海节能,2021,1(1):67-72.

# Adaptive Improvement and Application of Relay Protection Technology in Smart Grid Context

Fantao Wu

Yunfeng Power Plant, State Grid Lüyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

## Abstract

The increasing complexity of smart grids and large-scale integration of renewable energy have posed challenges to traditional relay protection systems, including insufficient sensitivity, delayed response, and poor adaptability. This paper explores adaptive improvement pathways for relay protection based on smart grid operational characteristics. Through analyzing adaptive protection principles, information fusion mechanisms, and intelligent algorithms, optimized strategies are proposed for distributed power sources, power electronic devices, and multi-node communication environments. Research demonstrates that integrating artificial intelligence algorithms, online parameter identification, and multi-source data fusion technologies enables dynamic parameter tuning and real-time decision-making for protection systems. Simulation and engineering validation results show that adaptive protection systems exhibit enhanced sensitivity and reliability under complex operating conditions, providing technical support for building intelligent relay protection frameworks.

## Keywords

smart grid; relay protection; adaptive protection

## 智能电网背景下继电保护技术的自适应改进与应用

吴钊滔

国网绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

## 摘要

智能电网的复杂化与新能源大量接入使传统继电保护面临灵敏度不足、动作迟滞和适应性差等问题。本文结合智能电网运行特征，探讨继电保护的自适应改进路径。通过分析自适应保护原理、信息融合机制与智能算法，提出在分布式电源、电力电子化设备及多节点通信环境下的优化策略。研究表明，结合人工智能算法、在线参数辨识及多源数据融合技术，可实现保护参数的动态整定与实时决策。仿真与工程验证结果显示，自适应保护系统在复杂运行条件下具备更高的灵敏度与可靠性，为智能化继电保护体系的构建提供了技术支撑。

## 关键词

智能电网；继电保护；自适应保护

## 1 引言

智能电网的发展推动了电力系统从集中式向分布式、多节点、信息化方向转型。新能源发电的高比例接入、电力电子装置的广泛应用以及实时通信技术的深度融合，使得电网运行状态更加动态复杂。传统继电保护依赖静态整定参数，在面对频繁变化的网络拓扑和潮流分布时，难以保持精确的动作特性，甚至可能出现拒动或误动现象。为适应智能电网的实时特性和广域协调需求，继电保护技术亟须实现由“固定阈值”向“自适应决策”的转变<sup>[1]</sup>。本文从系统架构、算法改进与工程实践三个层面，深入分析自适应继电保护的实现机理与应用效果，旨在为智能电网的安全防护体系提供创新路径。

【作者简介】吴钊滔（1989—），男，中国吉林集安人，本科，工程师，从事电气二次继电保护研究。

## 2 智能电网特征下继电保护面临的技术挑战

### 2.1 复杂电网结构带来的保护协调困难

智能电网的高度互联与分布式特征使继电保护协调面临前所未有的挑战。多电源并网条件下，潮流方向呈双向变化，传统依赖单向功率流的保护逻辑难以准确识别故障区段。分布式电源接入导致短路电流分布呈现不确定性，不同运行方式下故障点的电气特征差异显著，致使电流差动保护与距离保护的选段边界模糊。同时，电力电子设备的广泛应用使电压、电流波形畸变，谐波与高频干扰增加，削弱保护元件的灵敏度与动作稳定性。广域测控系统引入的通信时延与数据抖动进一步加剧保护判断的不确定性，使系统协调与配合逻辑复杂化。如何在多节点、多电源耦合条件下实现统一协调成为继电保护技术发展的关键难题。

### 2.2 新能源接入下的动态特性影响

新能源的间歇性与随机性对继电保护的实时响应能力

提出更高要求。风电与光伏系统输出受气象条件波动影响较大，功率变化频繁且难以预测。传统以稳态模型为基础的保护算法无法准确捕捉新能源发电的动态响应特征。在并网节点发生故障时，逆变器控制的电流限幅机制使故障电流幅值受控，无法反映故障严重程度，造成过流与差动保护失效。此外，新能源在系统中占比提高后，短路容量下降，电压恢复过程变缓，易引发保护装置误动或拒动<sup>[2]</sup>。为应对这一特性，自适应保护需结合实时监测结果调整定值参数，以保持故障检测的灵敏性与动作的选择性，实现保护性能的动态最优。

### 2.3 通信与信息融合的复杂性

智能电网的自适应保护依赖于广域信息交互与多点同步测量，其性能在很大程度上取决于通信网络的可靠性与数据融合精度。广域测控系统（WAMS）通过 PMU、RTU 等设备实现数据采集，但通信链路的延迟、抖动与丢包现象会导致信息传输不完整，影响保护动作的时效性。若时间同步系统存在偏差，不同节点间数据将出现相位失配，从而引发误判或保护拒动。多源数据融合还需应对异构数据格式与噪声干扰问题。为保证保护动作的正确性与一致性，必须构建高精度时钟同步机制与数据冗余校验体系，并通过分层融合算法提升决策可靠性。通信与信息处理的高性能集成，是实现智能电网自适应保护的核心技术基础。

## 3 自适应继电保护技术的核心原理与体系构建

### 3.1 自适应保护的概念与原理

自适应继电保护是一种基于实时信息感知与智能算法决策的动态保护技术，其核心在于系统运行参数的自感知与定值的在线调整。传统继电保护采用静态定值，难以应对智能电网中潮流方向频繁变化、运行状态动态波动的特点。自适应保护通过采集电压、电流、频率、功率及相角等多维信号，结合电网状态估计模型，对系统工况进行实时识别，并依据变化趋势动态修正动作阈值。其算法框架融合了数据驱动与模型驱动两种思想：前者依赖历史数据训练模型，后者基于电气方程实时更新参数。通过自学习与预测机制，保护装置可在故障发生前进行趋势判断，在故障过程中实现动作逻辑的自调整。该技术显著提高了保护动作的准确性与适应性，能够在复杂运行环境下保持灵敏度、选择性与速动性的一致性，为智能电网的安全运行奠定基础。

### 3.2 信息融合与在线参数辨识

自适应继电保护的实现离不开高质量的信息融合与参数辨识机制。智能电网中数据来源复杂，来自 PMU（同步相量测量装置）、RTU（远动终端）和 SCADA 系统的信号需通过统一数据模型进行融合处理<sup>[3]</sup>。信息融合系统利用时间同步、数据清洗与异常检测技术，消除通信延迟、时钟偏移及测量噪声，确保数据一致性。在线参数辨识技术采用递推最小二乘法、扩展卡尔曼滤波或模糊自学习算法，对线路阻抗、系统等效参数及潮流分布进行动态估计，使保护装

置具备自感知与自诊断能力。通过融合多源异构数据与物理模型，系统可在运行状态波动或网络拓扑改变时实时更新保护逻辑，增强对工况突变的响应能力。这种融合机制不仅提高了状态估计精度，也为自适应保护的动态整定提供了可靠数据支撑。

### 3.3 广域协同与动态整定机制

广域协同是自适应继电保护体系的重要特征。随着智能电网的互联化发展，单一保护装置已难以应对跨区域、多节点的复杂故障。广域自适应保护通过通信网络实现保护装置间的协调联动，使不同节点的保护逻辑在统一的时间基准下协同运行。系统采用分层分布式架构设计，现场保护装置负责局部数据采集与故障判定，区域协调中心则进行跨区信息整合与策略优化，中央控制单元负责全网动态整定。通过实时潮流监测与参数协同调整，系统可根据不同运行模式自动优化保护定值，避免保护死区与越级动作。动态整定机制利用在线计算与状态预测模型，在检测到系统异常时即时修正定值，实现保护性能的全局优化。该协同机制提升了全网保护的响应一致性与协调性，是构建智能化、自适应继电保护体系的关键路径。

## 4 自适应继电保护的关键算法与技术路径

### 4.1 基于人工智能的保护算法

人工智能算法在智能电网的复杂非线性环境中展现出卓越的自学习与自适应特性。通过神经网络、支持向量机（SVM）及决策树等模型，可实现故障信号的快速识别与特征提取。神经网络依托海量训练样本建立输入特征与故障类型间的非线性映射，实现高精度判断；SVM 模型则在小样本条件下具备良好的分类性能，适用于稀疏数据环境。基于大数据的模式识别技术可构建电网运行状态与故障响应的映射模型，实现故障的实时预测。深度学习算法通过多层特征抽取，在高维时序数据中自动识别隐含规律，显著提升保护动作的准确性与鲁棒性。结合专家系统与模糊逻辑，可实现基于规则与经验的动态定值修正，使保护系统兼具逻辑解释性与自适应能力。人工智能的引入使继电保护由传统逻辑判断迈向智能决策阶段，显著增强了复杂电网中的故障诊断与响应效率。

### 4.2 基于动态特征的自适应整定方法

动态整定方法以实时监测与在线计算为核心，旨在根据系统运行状态变化动态调整保护定值。该方法通过对电压、电流、频率及功率变化率的连续跟踪，建立动态方程以描述电网的瞬态特征，实现保护参数的自学习更新。基于功率变化率的自调整算法能在潮流突变时快速修正阈值，避免因参数滞后引发误判；基于状态空间的预测控制模型则利用系统方程预测短期运行趋势，提前优化保护策略。动态整定的关键在于平衡灵敏度与选择性，使保护在多故障条件下仍具稳定性。将动态整定与概率统计分析结合，可依据运行数

据的分布特性评估故障发生概率,从而优化动作门限,提高系统的安全裕度。研究表明,该方法能有效减少误动作,增强保护系统在不确定环境下的可靠性与适应性。

#### 4.3 数据驱动的多维决策优化

数据驱动方法为自适应继电保护提供了基于全局信息的优化思路。通过大数据平台对电网运行与故障历史数据进行聚类分析与特征提取,可揭示系统运行规律与潜在异常模式。多目标优化算法可对动作时间、灵敏度与选择性等关键性能指标进行权衡,实现保护策略的全局最优配置。基于强化学习的决策模型使保护装置具备“经验学习”能力,能在不断交互与反馈中自我优化决策规则。该机制通过奖惩函数调节策略选择,使系统在复杂环境下逐步趋向最优动作方案。多维决策模型不仅能够实现动态参数自整定,还能在多场景下保持鲁棒性与可扩展性。数据驱动的保护体系改变了传统基于静态模型的思维模式,使继电保护具备自主感知、智能判断与持续优化的能力,为电力系统的自适应运行提供了坚实的技术支撑。

### 5 自适应继电保护的工程应用与发展趋势

#### 5.1 在分布式电源系统中的应用

自适应继电保护技术在分布式电源系统中展现出显著优势。随着分布式光伏、风电等电源的大规模接入,配电网潮流呈现双向特性,传统基于固定值的保护逻辑难以适应复杂的功率反向流动。自适应保护通过实时监测节点电压、电流及功率变化,结合参数辨识算法动态计算线路阻抗,实现保护定值的在线调整。当分布式电源运行状态变化或潮流方向反转时,保护系统能依据实时数据自适应修正阈值,避免误判。引入功率方向判据与多点测量数据融合,使故障定位更加精确,动作时间显著缩短。仿真与实验结果表明,自适应保护在典型辐射型与环网结构中均能实现故障快速识别,动作延迟降低约40%,同时误动作率明显下降,为分布式系统的安全与灵活运行提供了技术支撑。

#### 5.2 在柔性直流与电力电子化系统中的应用

柔性直流输电及电力电子化系统具有高控制灵活性和强非线性特征,其故障特征与传统交流系统显著不同。由于换流器输出受控,短路电流被限流,传统保护装置依赖的电流幅值与相角判据不再适用。自适应继电保护通过实时检测

换流阀状态、直流母线电压与电流变化率,结合模型预测控制算法对故障类型与位置进行快速判定。基于AI优化的特征识别模型可在数毫秒内识别异常波形,实现保护参数的自整定与动作逻辑动态优化。该方法兼顾灵敏度与选择性,能有效应对双极短路、接地及单极故障等多种场景。工程应用表明,自适应保护在柔性直流系统中的动作响应速度提高30%以上,显著增强了系统运行的安全性与可控性。

#### 5.3 未来发展趋势与挑战

自适应继电保护的未来发展方向正向智能协同化、云平台化与标准化体系建设演进。随着边缘计算与物联网技术的融合,保护装置可通过云边协同架构实现算法远程升级与参数动态优化,提升全网保护协调效率。数字孪生与人工智能的结合将赋予系统实时仿真、状态预测与自学习能力,使保护逻辑从被动响应转变为主动防御。同时,广域自适应保护的推广仍面临通信延时、数据安全与算法可靠性等挑战。构建统一的通信协议、数据安全防护及算法验证体系,成为保障大规模应用的关键。未来,基于云端协同的智能保护平台将成为电力系统自适应防护的核心,实现全网保护的动态优化与标准化运行。

### 6 结语

智能电网的发展对继电保护技术提出了更高要求,自适应继电保护作为重要方向,正成为电力系统安全防护的核心技术。通过信息融合、在线辨识与智能算法的协同作用,继电保护实现了从静态整定向动态自优化的转变。工程实践表明,自适应保护系统在复杂电网中表现出更高的灵敏度与鲁棒性,为新能源接入和电力电子化设备提供了可靠的保护支撑。未来,随着人工智能、边缘计算与数字孪生等技术的深入应用,自适应继电保护将进一步实现自学习与自决策功能,构建覆盖全网的智能防护体系,推动电网安全性、稳定性与智能化水平的整体提升。

#### 参考文献

- [1] 徐川川.智能电网中继电保护系统的动态适应性研究[J].家电维修,2025,(02):143-145.
- [2] 李振兴.智能电网层次化保护构建模式及关键技术研究[D].华中科技大学,2013.
- [3] 刘强,瞿汉飞,张少腾.新时代背景下继电保护技术在智能电网中的应用[J].自动化应用,2024,65(S1):106-108+112.

# Application Study of PLC and Inverter Combined Control in Chemical Conveying Systems

Ke Huang

CNOOC(Hainan)Fudao Chemical Ltd., Dongfang, Hainan, 572600, China

## Abstract

With the increasing demand for automation control technology in the chemical industry, the joint control of PLC and frequency converters has been widely applied in chemical conveying systems. The PLC control system, with its flexible programming capabilities and powerful logical control functions, can achieve precise regulation of various components in the conveying system. Meanwhile, the frequency converter adjusts the motor speed to achieve precise control over the conveyor belt speed. The combined application of both not only enhances the automation level of the system but also optimizes energy efficiency, reduces energy consumption, and lowers maintenance costs.

## Keywords

PLC control system; frequency converter; chemical conveying system; automation control; energy optimization

## PLC 与变频器联合控制在化工输送系统中的应用研究

黄珂

海洋石油富岛有限公司, 中国·海南东方 572600

## 摘要

随着化工行业对自动化控制技术的需求不断增加, PLC与变频器联合控制在化工输送系统中得到广泛应用。PLC控制系统凭借其灵活的编程能力和强大的逻辑控制功能, 能够实现对输送系统各个环节的精准调控, 而变频器则通过调节电机转速, 实现对输送带速度的精准控制。两者的联合应用, 不仅提升了系统的自动化水平, 还优化了能源利用效率, 降低了能耗和维护成本。

## 关键词

PLC控制系统; 变频器; 化工输送系统; 自动化控制; 节能优化

## 1 引言

在现代化生产过程中, 输送系统作为重要的生产设备, 承担着物料输送、加工及储存的任务。随着生产规模的不断扩大, 传统的机械驱动系统逐渐无法满足高效、节能及高稳定性的需求。因此, 自动化控制技术在化工输送系统中的应用成为提升生产效率和保障生产安全的关键。PLC 与变频器作为现代化自动化控制系统中的两项重要技术, 通过各自的优势实现了对输送系统的高效管理。PLC 凭借其强大的程序控制能力, 能够根据生产需求灵活调整输送系统的工作模式; 变频器则通过调节电机转速来精确控制输送带的运行速度, 实现精确的物料输送。PLC 与变频器联合控制的方案, 极大地提升了输送系统的自动化水平, 优化了能源消耗, 减少了人为操作失误, 降低了设备故障率。

## 2 PLC 与变频器联合控制技术概述

### 2.1 PLC 控制系统概述

PLC (可编程逻辑控制器) 是一种用于工业自动化控制系统的设备, 其主要功能是通过编程控制各种生产过程中的机械设备。PLC 的核心优势在于其灵活的控制能力, 能够通过用户编写的程序, 实现对生产线的实时监控与自动调节。通过对输入信号的采集与处理, PLC 可以实时控制输出设备的动作, 保证生产过程的精确性与稳定性。PLC 具有高可靠性、易于维护与升级等特点, 广泛应用于自动化生产、设备监控等领域。其多种通讯协议的支持也使得 PLC 能够与其他设备如传感器、执行器等进行无缝连接, 确保整个自动化系统的高效运行。

### 2.2 变频器控制技术概述

变频器 (VFD, Variable Frequency Drive) 是一种用于调节电机转速和控制电机驱动的电子设备。通过改变电源频率, 变频器能够精确控制电机的转速, 从而实现对设备运行状态的调节。变频器不仅可以有效调整电机的运行速度,

【作者简介】黄珂 (1990—), 男, 中国山西人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其自动化研究。

还能够不同负载条件下保持较高的能效，并减少设备的磨损，提高其使用寿命。变频器广泛应用于各种需要精确调速的场合，尤其在传送带、风机、水泵等设备中应用广泛。通过与 PLC 等自动化控制系统结合，变频器能够实现对整个生产线的动态调节，确保生产过程中的稳定性与精确性。

### 2.3 PLC 与变频器联合控制的优势与应用前景

PLC 与变频器的联合控制能够将两者各自的优势有效结合，提高整个控制系统的效率与稳定性。PLC 通过其强大的逻辑控制能力，实现对生产过程的全局管理，而变频器则通过精确控制电机的转速，提供灵活的调节方式。两者的联合应用可以显著提高生产线的自动化水平，降低能耗，提高设备的运行效率和使用寿命。同时，这种控制方式也能够适应不同生产需求的变化，灵活应对复杂的生产环境。随着工业自动化和智能制造的发展，PLC 与变频器联合控制技术在化工、机械、食品、制药等行业的应用前景非常广阔<sup>[1]</sup>。未来，随着技术的不断发展与完善，这一控制系统将逐步向更高效、更智能的方向发展，进一步提升生产效率与资源利用率。

## 3 PLC 与变频器联合控制在化工输送系统中的原理

### 3.1 PLC 与变频器的工作原理

PLC 与变频器联合控制系统通过 PLC 控制电机的变频器，实现对输送系统的精确调速。PLC 通过采集传感器反馈的信号，实时监控生产状态，并根据预设程序对变频器输出控制信号，进而调节电机的运行状态。变频器根据 PLC 指令改变电机的频率和转速，从而控制输送带的运行速度。该系统能够精确控制输送带的物料输送速度，并根据生产需求动态调整，提高生产效率与设备的利用率。PLC 的程序逻辑控制与变频器的速度控制相结合，能够在实现自动化的同时提高系统的柔性和适应性。

### 3.2 PLC 与变频器联合控制的核心技术

PLC 与变频器联合控制的核心技术在于两者之间的实时通讯与协调。PLC 通过与变频器的通信协议（如 Modbus、Profibus 等）进行数据交互，能够根据生产需求发送控制指令，调整变频器的输出频率。变频器接收到 PLC 的控制信号后，调节电机的频率以实现输送带速度的精确控制。此过程需要保证 PLC 与变频器之间数据传输的实时性和准确性，同时还要根据生产线负载情况调整控制策略。核心技术还包括系统的故障诊断与保护功能，在出现设备故障或异常时，PLC 可以立即发出警报并启动应急处理措施，保障系统安全稳定运行。

### 3.3 化工输送系统中控制方案的设计与实现

在化工输送系统中，PLC 与变频器联合控制方案的设计主要包括硬件配置、控制策略与通讯方案的选择。硬件配置方面，需要根据生产线的特点选择适合的 PLC 型号和变

频器，并确保两者之间的兼容性与可靠性。控制策略方面，应根据物料输送速度、生产需求以及设备运行状态设计合理的控制算法，确保系统在不同工况下均能稳定运行。通讯方案则需要选择适合的协议，如 Modbus、Profibus 等，以保证 PLC 与变频器之间的数据交换顺畅高效。实现过程中，需进行系统的调试与优化，确保 PLC 能够实时响应生产变化，并精确调控变频器的输出，最终实现化工输送系统的高效、稳定运行<sup>[2]</sup>。

## 4 PLC 与变频器联合控制在化工输送系统中的应用分析

### 4.1 应用场景及需求分析

化工输送系统广泛应用于物料的搬运、分配和处理等环节，尤其是在化工原料和产品的高效运输中起到至关重要的作用。随着化工行业自动化水平的提高，传统的输送系统已逐渐无法满足现代化生产的需求。精确控制输送带的速度，确保物料运输的稳定性和均匀性，成为化工行业的一项关键需求。PLC 与变频器联合控制技术能够满足这些要求，PLC 具备强大的逻辑处理能力，可以根据生产需求自动调节和优化系统的运行；而变频器则通过控制电机的转速，实现对输送带的精确调速，确保物料的流动不会受制于传统的固定转速电机。该联合控制系统的应用场景主要体现在物料输送、混合、分拣等方面。通过实时监控与调节，系统可以适应不同的生产需求，实现物料输送速度的精确控制，从而提高生产效率，减少能源浪费，并降低人为操作的风险。

### 4.2 联合控制系统的实现方式

PLC 与变频器联合控制系统通过标准化的通信协议实现数据交换和信号传输。在此系统中，PLC 作为主控单元，负责采集现场的各类数据，包括输送带的负载、物料流速、温湿度等，然后根据设定的控制策略进行决策。PLC 会通过通信协议（如 Modbus 或 Profibus）向变频器发出调速指令，从而改变电机的频率和转速，进而调整输送带的运行速度。变频器接收到 PLC 的指令后，调节电机的运行频率，确保输送带的速度在设定范围内。为了优化控制效果，变频器和 PLC 之间建立了反馈机制，变频器根据电机的负载和速度变化向 PLC 传递实时数据，PLC 再根据这些数据调整控制策略。此外，PLC 系统还能够对变频器的运行状态进行监测，并在出现异常时采取应急措施，保障系统稳定运行。整个过程不仅依赖于 PLC 与变频器的协作，还结合了传感器和智能诊断模块，通过精准的控制算法和数据反馈，提高系统的自适应能力和故障处理能力。

### 4.3 PLC 与变频器联合控制对输送系统性能的提升

PLC 与变频器联合控制技术能够显著提升化工输送系统的性能，尤其在精度控制、能效优化和系统稳定性方面具有明显优势。PLC 系统通过精准的控制策略和实时数据分析，可以快速响应生产过程中出现的任何变化，调整变频器的工

作状态,以适应不同的生产需求。在输送过程中,变频器通过调节电机转速来精确控制输送带速度,避免了传统固定转速系统的弊端,使得输送过程更为平稳且灵活。此外,通过与变频器的协作,PLC能够优化电机的使用状态,根据实际负荷调整电机转速,避免电机过度负荷或低效运行,从而提高了整个输送系统的能效。联合控制技术的应用使输送系统能够高效运行,减少了设备的摩擦和损耗,提高了系统的可靠性和生产效率。最终,PLC与变频器的结合不仅提升了输送系统的自动化水平,也为化工生产带来了更高的灵活性和效率。

## 5 PLC与变频器联合控制在化工输送系统中的实施效果

### 5.1 提高输送系统的自动化与稳定性

PLC与变频器联合控制系统能够大幅提高化工输送系统的自动化和稳定性。PLC作为核心控制单元,能够实时处理来自传感器的数据并根据设定程序调整变频器的输出频率,使输送带的速度始终保持在最佳状态。PLC与变频器的协同工作,自动调节输送带的速度,避免了手动操作和固定速度系统的弊端,极大提高了系统的自动化水平。同时,PLC控制系统可以对各个环节进行协调管理,确保各个部分的精密配合。变频器通过控制电机的转速,保障了输送带的稳定运行,即使在负载或生产要求波动的情况下,系统仍能平稳运行。通过这一联合控制系统,输送带的速度控制变得更加灵活,系统运行中的干扰也大大减少,进一步提高了生产的稳定性。PLC与变频器的协作不仅使生产过程更加精细化,还提高了系统响应速度和故障处理能力,确保了生产过程中的连续性与稳定性<sup>[3]</sup>。

### 5.2 优化能效与节能效果

PLC与变频器联合控制系统能有效优化能效,降低整体能耗。传统的输送系统常常采用固定速度运行方式,无论负载高低,电机都始终保持固定转速,造成了能源的浪费。PLC与变频器联合控制系统通过实时采集负载和速度数据,精确调节电机的运行状态,确保电机根据负荷变化进行转速调整,从而实现高效的能源利用。通过这种智能调节,变频器能够根据物料的实际输送需求,优化电机的工作频率和功率,避免了传统方法中的过度能耗。例如,在物料运输过程中,当负载较低时,系统会自动减少电机转速,降低能耗;而在负载较重时,系统则会自动增加转速,确保输送系统不出现卡顿或停滞。这一过程中,PLC系统发挥了核心作用,它根据传感器反馈的数据,实时调整控制策略,避免了能源

的浪费,并在一定程度上延长了设备的使用寿命,实现了更高的能源效率和节能效果。

### 5.3 提高系统的安全性与可靠性

PLC与变频器联合控制系统能够显著提高化工输送系统的安全性与可靠性。PLC负责对整个输送系统的运行状态进行实时监控,并通过程序逻辑判断各类异常状况。无论是电机过载、变频器故障还是其他外部环境的变化,PLC都能快速响应,并通过通讯协议发出相应的调整或停止信号。例如,在电机出现过载的情况下,PLC会通过变频器降低电机转速,避免因电流过大而造成电机损坏。变频器还具有过载保护和过热保护功能,当系统出现异常时,它能够自动切断电源,防止进一步损坏设备。整个系统的联动机制确保了在出现任何故障或异常时,能够及时采取预防性措施<sup>[4]</sup>。PLC与变频器的联合工作提高了系统的容错能力和自我修复能力,使得系统在面对复杂工况时仍能够保持高效、稳定的运行。同时,智能诊断系统能够实时反馈设备的运行状况,确保生产过程中设备的长期稳定运行,降低了故障率,提升了生产安全性和设备可靠性。

## 6 结语

PLC与变频器联合控制在化工输送系统中的应用,显著提高了系统的自动化水平、能源利用效率和运行稳定性。通过PLC与变频器的紧密协作,不仅优化了输送带的调速过程,还能够在各种生产条件下动态调整系统运行,以应对不同的负载需求。该技术的实施,减少了人为干预,提高了生产过程的精度与安全性,同时大幅降低了能源消耗和维护成本。随着自动化技术的不断发展,PLC与变频器联合控制在化工行业中的应用前景广阔。未来,随着智能化与信息化的进一步发展,该技术将在提高生产效率、降低能耗和提升系统可靠性方面发挥更加重要的作用,为化工行业的智能制造和绿色生产提供有力支持。

### 参考文献

- [1] 褚小立,陈瀑,许育鹏,李敬岩.近红外光谱在炼油和化工领域的研究与应用实践[M].化学工业出版社:202411.
- [2] 靳杰.PLC控制系统在除尘器卸输灰气力输送中的应用[J].天津冶金,2019,(04):65-67.
- [3] 王欣.基于PLC的石油钻杆生产线物料输送系统[J].自动化应用,2014,(10):25-26+85.
- [4] 匡杰.气力输送系统在防爆化工成产中基于上位机与PLC通讯应用[A].传承、创新、智慧与合作:首届物流工程国际会议论文集(一)[C].中国机械工程学会、中国机械工程学会物流工程分会、北京起重运输机械设计研究院:2012:188-194.

# Evaluation of Jelly Shelf Life Change by Physical Property Testing Methods and Sensory evaluation

Jiani Luo<sup>1</sup> Shaolin Wang<sup>1</sup> Changshu Liu<sup>1,2</sup> Sai Wang<sup>1,2</sup>

1. Standard Investment (China) Co.,Ltd., Shanghai, 201103, China

2. Jiangsu Hua Sun Health Technology Co. Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215400, China

## Abstract

The texture and flavor of jellies can undergo significant alterations during extended storage periods, directly impacting their market appeal and consumer satisfaction. This paper presented a systematic investigation into the changes in flavor and texture of jellies over their shelf-life, utilizing a physical property tester and sensory evaluation techniques. Through accelerated experiments designed to simulate the textural and flavor changes during prolonged storage, and combined with consumer sensory evaluation, the relationship between physical properties such as hardness, elasticity, and water exudation rate of jelly and its sensory acceptance was explored. The research demonstrated that as storage time increased, both the texture and flavor of jelly underwent significant alterations, with hardness decreasing by over 60% and water exudation rate markedly increasing. These changes corresponded to a notable decline in sensory acceptance, as consumers perceived a significantly softer texture, increased juiciness, and a more sour flavor, which aligned with the observed textural changes.

## Keywords

jelly; shelf life; sensory evaluation; physical property test

## 采用物性测试及感官评价监测果冻货架期变化

罗嘉妮<sup>1</sup> 王少林<sup>1</sup> 刘昌树<sup>1,2</sup> 王赛<sup>1,2</sup>

1. 佳格投资(中国)有限公司, 中国·上海 201103

2. 江苏华膳健康科技有限公司, 中国·江苏 苏州 215400

## 摘要

果冻在长期储存过程中,其质构和风味可能会发生显著变化,直接影响到其市场接受度和消费者满意度。本文采用物性测试仪对果冻在货架期内的质构变化进行了系统研究。通过加速实验的方式模拟果冻在长时间储存过程中的质构和风味变化,并结合消费者感官评价,探讨了果冻的硬度、弹性、析水率等物性指标与其感官接受度之间的关系。研究表明,随着存储时间的延长,果冻的质构与风味均出现了显著变化,硬度下降超过60%和析水率明显增加,这也导致了感官中的接受度的显著下降趋势。因为消费者感受到了明显变弱,汁水变多,风味变酸等现象与质构变化对应。

## 关键词

果冻; 货架期; 感官评价; 物性测试

## 1 引言

果冻是由果冻胶、甜味剂、增稠剂和香精等加工而成的胶冻食品,因其外观晶莹通透,色泽鲜艳多样,口感软滑爽脆,风味酸甜适口,受到广大消费者的喜爱,我国的果冻类产品的市场需求呈现快速增长趋势<sup>[1]</sup>。然而,在果冻的货架期内,随着储存时间的延长,其风味和质构可能会发生变化,这将直接影响产品的市场接受度和消费者体验<sup>[2-4]</sup>。传统的货架期预测方法主要基于加速试验后果冻的微生物结果及口感的经验判断<sup>[5]</sup>,存在检测指标单一、主观性强且缺

乏系统量化表征等局限性,难以全面反映贮藏过程中产品理化特性与感官品质的协同劣变规律。

本研究旨在探索采用物性测试仪结合感官评价方法对果冻的物理性状和口感特征进行分析,对完善果冻的货架期预测理论体系具有重要理论价值,同时为果冻行业优化产品配方工艺参数、实施产品量化质量管理提供技术支撑。

## 2 材料与amp;方法

### 2.1 主要材料与试剂

酵素果冻、胶原蛋白肽果冻、蓝莓果冻由江苏华膳健康科技公司生产提供。

### 2.2 主要仪器与amp;设备

Texture-Pro 物性测定仪: Brookfield Engineering Labs; ME3002E 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公

【作者简介】罗嘉妮(1996—),女,中国江苏无锡人,硕士,工程师,从事食品科学研究。

司; HH-4 数显恒温水浴锅, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; 一次性塑料杯, 石家庄市福多源餐具有限公司。

### 2.3 实验方法

#### 2.3.1 储存实验

加速储存实验是一种高效预测食品货架期的方法, 通过将食品置于高温、高湿等恶劣环境中加速变质, 定期检测其品质指标变化, 结合数据推算其在常规贮藏条件下的保质期<sup>[6]</sup>。将三款果冻产品进行常温货架期实验测试, 并按行业经验置于 40℃, 75% 湿度的恒温恒湿箱进行加速实验, 加速系数为 6。常温样品每 6 个月取样进行感官及物性指标测试, 加速样品每个月取样做同样测试。果冻标准样品则在实验开始时, 放进冰箱冷藏 4℃ 保存。

#### 2.3.2 质构测定方法

分别称取 30g 样品置于直径 5cm 的塑料杯中, 将样品固定于物性测试仪上, 使用 TA5 探头, 测试速度设定为 1.0 mm/s, 压缩形变量设定为 50%, 平行测试三次, 以确保测试结果的稳定性和重复性<sup>[7,8]</sup>。质构测试中, 会记录硬度、弹力、弹性指数等指标。每月取样测试加速实验样品。

#### 2.3.3 感官评价方法

本研究采用了感官接受性测试法, 具体感官问卷见表 1。实验邀请了至少 30 名经过专业培训的评价员对样品进行评估。每名评价员需在标准化的环境中, 对样品的酸甜感、汁水、风味、口感等多项感官指标进行评分, 品尝标准样品与加速实验样品, 并最终判断其是否愿意再次购买或接受该产品<sup>[9]</sup>。感官评价过程严格遵循标准操作流程, 确保评价结果的客观性和公正性。所有的感官评价结果均以百分比形式呈现, 记录接受率、不接受率及相应的评价理由。产品接受度 (%) = (与标样无差异人数 + 可接受差异人数) / 总参与人数 \* 100%, 当产品接受度 < 50%, 即认为超过一半以上人无法接受产品, 达到货架期终点。

表 1 果冻感官问卷内容

序号	项目	结果	
		是	否
1	与标样是否存在差异	是	存在差异
		否	不存在差异
2	若回答是, 请问差异是否可接受	是	可以接受
		否	不可以接受
3	若回答否, 请问不接受的原因是什么	从酸甜感、汁水感、风味、口感等角度说明理由	

#### 2.3.4 析水率测试

析水率的测定方法参考陈美花等<sup>[10]</sup>的方法, 先称取单

条果冻总质量 (单条果冻净含量: 27g), 将果冻表面及包装上的水分用纸巾吸干后再次测试果冻析水后的重量, 记录样品的原本质量和水分吸干后质量, 并计算析水率。析水率的计算公式为:

$$\text{析水率}(\%) = \frac{\text{原本总质量} - \text{水分吸干后质量}}{\text{原本质量}} \times 100\%$$

#### 2.3.5 数据分析与处理

数据使用 WPS 软件整理, 运用 Prism 软件采用 Anova 方法进行差异显著性分析 (P < 0.05), 所有样品测试 3 次, 结果以平均值 ± 标准偏差表示。

## 3 结果与分析

### 3.1 质构测试结果分析

本研究首先对果冻的质构指标进行了系统分析。硬度被定义为压缩循环中的最大负载值, 反映了果冻在受到压缩时的抵抗力, 代表了果冻结构的紧实程度。实验结果表明, 随着储存时间的增加, 三支果冻的硬度都显著下降 (如表 2-4)。蓝莓果冻从标样 (0 月) 的 681 g 逐渐下降至加速储存 4 个月后的 249g, 酵素果冻硬度从 548 g 下降至 206 g, 胶原蛋白果冻硬度从 561 g 下降至 219 g, 硬度下降均超过 60%。这一变化反映了果冻在储存过程中其内部结构逐渐松散, 胶体网络结构被破坏, 导致硬度降低 (如表 2、3、4 所示)。常温储存过程中, 三款果冻硬度呈现相同趋势 (见图 1), 随着储藏时间增加, 硬度呈现显著下降趋势, 特别是前 6 个月。

弹力表示果冻在形变后能恢复原状的能力, 是可恢复功 / 压缩功的比例, 体现了果冻的结构稳定性和柔韧性。即: 弹力越大, 形变所需的能量越多。然而果冻的弹力指标在货架期表现出了与硬度、弹力相反的趋势, 随着货架期时间延长, 弹力呈现出先增长后下降的趋势, 推测可能是由于果冻中水分逐渐析出后影响了整体质构。常温储存过程中, 果冻弹力与加速储存过程相同, 呈现先增后降趋势。

弹性是指果冻从变形状态恢复的能力, 是在第一次压缩与第二次压缩之间恢复的高度, 反映了果冻的韧性。果冻的弹性随着贮藏时间的推移也表现出类似的下降趋势 (见表 2、3、4)。蓝莓果冻和酵素果冻的弹性随着加速时间推移有下降趋势, 且酵素果冻呈显著下降 (p < 0.05), 其弹性为 6.90 mm, 而加速 5 个月后的样品弹性降至 6.19 mm。尽管这一变化幅度不如硬度显著, 但仍然反映了果冻在储存过程中内部结构的变化。

表 2 蓝莓果冻加速 4 个月质构数据分析

指标	0 月	加速 1 月	加速 2 月	加速 3 月	加速 4 月
硬度 (g)	681.00 ± 13.72 <sup>a</sup>	422.33 ± 10.96 <sup>b</sup>	349.67 ± 15.8 <sup>c</sup>	296.97 ± 10.26 <sup>d</sup>	249.00 ± 11.00 <sup>e</sup>
弹力	0.24 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.27 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.31 ± 0.00 <sup>a</sup>
弹性 (mm)	7.05 ± 0.08 <sup>a</sup>	7.19 ± 0.05 <sup>a</sup>	6.88 ± 0.07 <sup>a</sup>	6.70 ± 0.42 <sup>a</sup>	6.98 ± 0.08 <sup>a</sup>
析水率 (%)	9.20 ± 1.83 <sup>a</sup>	10.73 ± 2.07 <sup>a</sup>	12.38 ± 0.94 <sup>a</sup>	10.80 ± 3.29 <sup>a</sup>	10.69 ± 1.98 <sup>a</sup>

注: 表中标有不同小写字母表示同一指标在不同加速时间的样品具有显著性差异 (P < 0.05)

表 3 酵素果冻加速 4 个月质构数据分析

指标	0 月	加速 1 月	加速 2 月	加速 3 月	加速 4 月
硬度 (g)	548.00 ± 5.78 <sup>a</sup>	331.33 ± 9.67 <sup>b</sup>	295.00 ± 22.45 <sup>b</sup>	254.33 ± 5.69 <sup>c</sup>	206.00 ± 20.07 <sup>d</sup>
弹力	0.26 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.30 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.01 <sup>a</sup>
弹性 (mm)	6.90 ± 0.04 <sup>ab</sup>	7.10 ± 0.07 <sup>a</sup>	6.69 ± 0.11 <sup>ab</sup>	6.65 ± 0.16 <sup>abc</sup>	6.45 ± 0.26 <sup>bc</sup>
析水率 (%)	10.25 ± 0.79 <sup>a</sup>	10.97 ± 1.60 <sup>a</sup>	12.77 ± 3.27 <sup>a</sup>	12.62 ± 3.22 <sup>a</sup>	13.11 ± 1.63 <sup>a</sup>

注：表中标有不同小写字母表示同一指标在不同加速时间的样品具有显著性差异 (P < 0.05)

表 4 胶原蛋白肽果冻加速 4 个月质构数据分析

指标	0 月	加速 1 月	加速 2 月	加速 3 月	加速 4 月
硬度 (g)	560.5 ± 15.63 <sup>a</sup>	339.67 ± 23.10 <sup>b</sup>	332.33 ± 28.64 <sup>b</sup>	242.33 ± 33.98 <sup>c</sup>	219.67 ± 2.08 <sup>c</sup>
弹力	0.21 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.23 ± 0.01 <sup>a</sup>
弹性 (mm)	7.15 ± 0.06 <sup>bc</sup>	7.46 ± 0.09 <sup>a</sup>	6.93 ± 0.06 <sup>c</sup>	6.99 ± 0.01 <sup>c</sup>	7.30 ± 0.07 <sup>ab</sup>
析水率 (%)	8.94 ± 1.75 <sup>a</sup>	7.70 ± 0.85 <sup>a</sup>	8.00 ± 1.87 <sup>a</sup>	6.81 ± 0.56 <sup>a</sup>	9.14 ± 1.56 <sup>a</sup>

注：表中标有不同小写字母表示同一指标在不同加速时间的样品具有显著性差异 (P < 0.05)

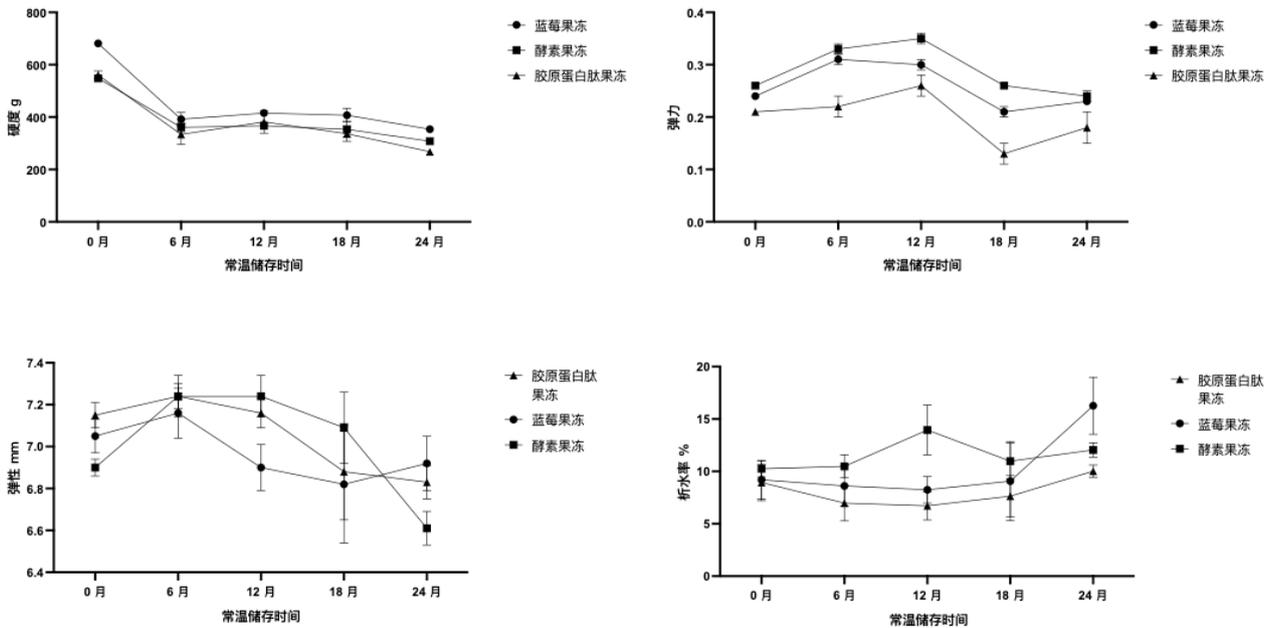


图 1 三款果冻常温 24 个月硬度、弹力、弹性、析水率变化

### 3.2 感官评价结果分析

感官评价结果显示，随着储存时间的增加，消费者对酵素果冻的接受率逐渐下降。实验初期（1 个月）蓝莓果冻的接受率为 82%，但到加速储存 4 个月后，接受率降至 41%，达到货架期终点。常温 24 个月，接受率降到 56%，已接近货架期终点。根据问卷结果发现不接受的消费者，主要原因是口感变软，汁水变多且风味更酸且不甜。这一变化可以与果冻质构数据对应，果冻在储存过程中，硬度的降低使得结构更加松散，更多汁水流出，也与析水率上升趋势的结果相一致，由于果冻内部水分流失，导致果冻中的风味物质被带走，使得整体风味的下降<sup>[11]</sup>，显著影响了消费者的感官体验。

酵素果冻的感官接受度结果与蓝莓果冻相似，在加速 4

个月以及常温 24 个月时接受度直线下降，达到货架期终点。胶原蛋白肽果冻在整个加速储藏及常温过程中接受度相对于其他两只果冻，更加稳定，推测是由于其虽然硬度降低，但其析水率变化较小，风味变化不明显。

### 3.3 析水率结果分析

析水率测试用于评估果冻在不同储存时间下的离水情况，它反映了果冻在储存过程中保持其原始形态的能力<sup>[12]</sup>。析水率的增加通常伴随着果冻质地的改变，如变得更加松散或变软，这些变化在感官上可能会被消费者感知为口感差或产品不新鲜。加速实验期间，析水率的结果呈现上升趋势但无显著性差异。在实际的果冻售卖过程，包装、运输、堆叠、是否受到挤压都会影响果冻的析水率结果<sup>[13]</sup>。

表5 三款果冻常温及加速货架期感官接受度结果

货架期	0月	加速1月	加速2月	加速3月	加速4月	常温6月	常温12月	常温18月	常温24月
蓝莓果冻	100%	82%	88%	82%	41%	94%	82%	82%	56%
酵素果冻	100%	80%	76%	75%	48%	86%	85%	74%	63%
胶原蛋白肽果冻	100%	94%	85%	91%	74%	84%	82%	75%	81%

## 4 结语

本研究旨在用物性测试方法，系统分析了果冻在货架期内的质构与风味变化，为预测果冻的货架期提供了新的研究思路与方法。结果表明，随着储存时间的延长，酵素果冻的硬度、弹性和析水率等指标发生了显著变化，这些变化与感官评价中消费者的感知相一致。特别是硬度和弹性的下降、析水率的增加，直接影响了消费者对果冻的接受度。本文对照了果冻加速与常温货架期内，指标的变化，虽然加速系数来源于行业经验，但其质构变化、感官结果仍具有一定参考性。这些发现不仅可以准确评估果冻在储存过程中的质构变化，还可以通过质构结果为果冻的货架期预测提供科学依据，有助于优化果冻产品的储存以及后续产品开发，帮助企业优化产品的储存条件，延长货架期，提高市场竞争力。

但本研仍存在一些不足之处。例如，本研究加速系数仍为行业经验，缺乏更系统地验证。此外，本研究中的感官评价仅限于30名评价员的主观反馈，未来可以考虑引入更多的消费者评价样本，以提高结果的代表性。

### 参考文献：

- [1] 潘晓军. 中性果冻质构影响因素及配方工艺[J]. 食品工业, 2024, 45(4): 30-33.
- [2] 张莉, 姜新杰, 刘英娜. 薄荷黄瓜果冻的制作工艺及优化[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(5): 45-50.
- [3] 刘雨卉, 郑诗绮, 杨莹, 等. 柠檬葡萄酒果冻制作工艺研究[J]. 现代食品, 2019(7): 80-82.
- [4] 宋恒波. 茶粉可吸果冻的研制及其货架期的预测[D]. 安徽农业大学, 2017.
- [5] 赵镭, 刘文, 汪厚银. 食品感官评价指标体系建立的一般原则与方法[J]. 中国食品学报, 2008(3): 121-124.
- [6] 任亚妮, 车振明, 靳学敏, 等. 应用ASLT法预测软面包的货架期[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(2): 156-158.
- [7] 霍红. 模糊数学在食品感官评价质量控制方法中的应用[J]. 食品科学, 2004(6): 185-188.
- [8] 楚炎沛. 物性测试仪在食品品质评价中的应用研究[J]. 粮食与饲料工业, 2003(7): 40-42.
- [9] 郭利利, 周显青, 熊宁, 等. 压榨型鲜湿米粉条感官评价方法的研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 253-261.
- [10] 陈美花, 黄舒喆, 牛改改, 等. 白茅根金银花复合果冻的研制[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(8): 129-138.
- [11] 李春红, 潘家荣, 张波. 物性测试仪对休闲食品酥脆性的测量[J]. 现代科学仪器, 2008(6): 59-62.
- [12] 王锡茂. 产品设计评价中感官评价方法的应用研究[J]. 现代食品, 2017(3): 67-69.
- [13] 李春红, 张明晶, 潘家荣. 物性测试仪在粘稠类食品品质评价上的应用研究[J]. 现代科学仪器, 2006(6): 111-113.
- [14] 刘朝龙, 王雨生, 陈海华, 等. 果冻质构与感官评定相关性的研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2012, 29(2): 115-120.
- [15] 田胜兰. 铁皮石斛渣可溶性膳食纤维的改性分析及在果冻中的应用[D/OL]. 南昌大学, 2023.

# Coupling Optimization of Intelligent Control and Integrated Steam Heat Exchange System in Steam Stripping Tower: Research on Technology Upgrade and System Energy Efficiency Leap

Tianlong Huang Hongbo Zhang Xingwen Li

Yunnan Yuntianhua Dawei Ammonia Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655338, China

## Abstract

To address operational challenges at Yunnan Dawei Ammonia Co., Ltd., including suboptimal tower top temperature, inefficient stripping efficiency, excessive ammonia nitrogen concentration in condensate, and frequent instrument blockages in the conversion stripping tower, our company implemented a technical innovation solution integrating an integrated steam heat exchange system, intelligent reflux liquid control, and condensate recycling. This paper provides a comprehensive analysis of the retrofitting background, technical approach, implementation details, and post-retrofit operational outcomes. Post-retrofit, the ammonia nitrogen concentration in the stripping tower's condensate outlet was significantly reduced from 12,000 mg/L before retrofitting to below 4,000 mg/L, far below the preset target of 8,000 mg/L. The solution effectively resolved instrument clogging issues, enhanced overall plant stability and environmental compliance, and demonstrated significant engineering applicability and economic benefits.

## Keywords

steam stripping tower; ammonia nitrogen purification; steam heat exchange technology; technology upgrade; operation optimization

## 变换汽提塔智能调控与集成蒸汽换热系统耦合优化—技术升级与系统能效跃升研究

皇天龙 张宏波 李兴文

云南云天化为制氨有限公司, 中国·云南 曲靖 655338

## 摘要

针对云南大为制氨有限公司变换汽提塔在运行过程中面临的塔顶温度偏低、汽提效率低下、冷凝液中氨氮浓度超标及仪表元件频繁堵塞等难题, 本公司实施了以“集成蒸汽换热系统+智能回流液调控+冷凝液循环利用”为核心的技术革新方案。本文全面剖析了改造背景、技术路径、实施细节及改造后的运行成效。改造后, 汽提塔出口冷凝液的氨氮浓度显著下降, 从改造前的12000 mg/L降至4000 mg/L以下, 远低于预设的8000 mg/L目标值, 有效解决了仪表堵塞问题, 提升了装置的整体运行稳定性和环保标准, 展现了显著的工程应用前景与经济效益。

## 关键词

变换汽提塔; 氨氮净化; 蒸汽换热技术; 技术升级; 运行优化

## 1 引言

变换装置作为合成氨生产流程中的核心环节, 其冷凝液中氨氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) 含量较高, 若处理不当, 不仅会引发环境污染, 还会导致后续工艺中的仪表元件堵塞, 进而影响系统的安全稳定运行。云南大为制氨有限公司的变换汽提塔自投入使用以来, 长期存在塔顶温度偏低 (约  $65^\circ\text{C}$ )、汽提效率低下的问题, 出口冷凝液的氨氮浓度一度高达 28000 mg/L,

严重制约了装置的长期稳定运行。为此, 公司于 2022 年启动了变换汽提塔技术改造项目, 旨在通过工艺优化与设备升级, 实现氨氮的高效脱除与系统的稳定运行。

## 2 现状与挑战分析

汽提塔 (C04131) 承担着处理来自变换气分离器、原料气分离器及洗氨塔冷凝液的任务。原系统中, 冷凝液未经预热直接进入汽提塔, 导致塔顶温度不足, 汽提效果不佳。出口氨氮浓度长期维持在 12000 mg/L 以上, 引发了以下问题:

问题一仪表堵塞频发: 高氨氮浓度的冷凝液易结晶, 导致调节阀、液位计等仪表元件堵塞;

【作者简介】皇天龙 (1986—), 男, 中国云南曲靖人, 化工总控工高级技师, 从事煤制合成氨工艺研究。

问题二运行风险增加：仪表故障频发，对变换装置的安全运行构成威胁；

问题三环保压力增大：氨氮排放浓度超标，不符合绿色生产的要求。

### 3 技术升级方案

#### 3.1 技术路线

项目提出了三项核心改造措施：

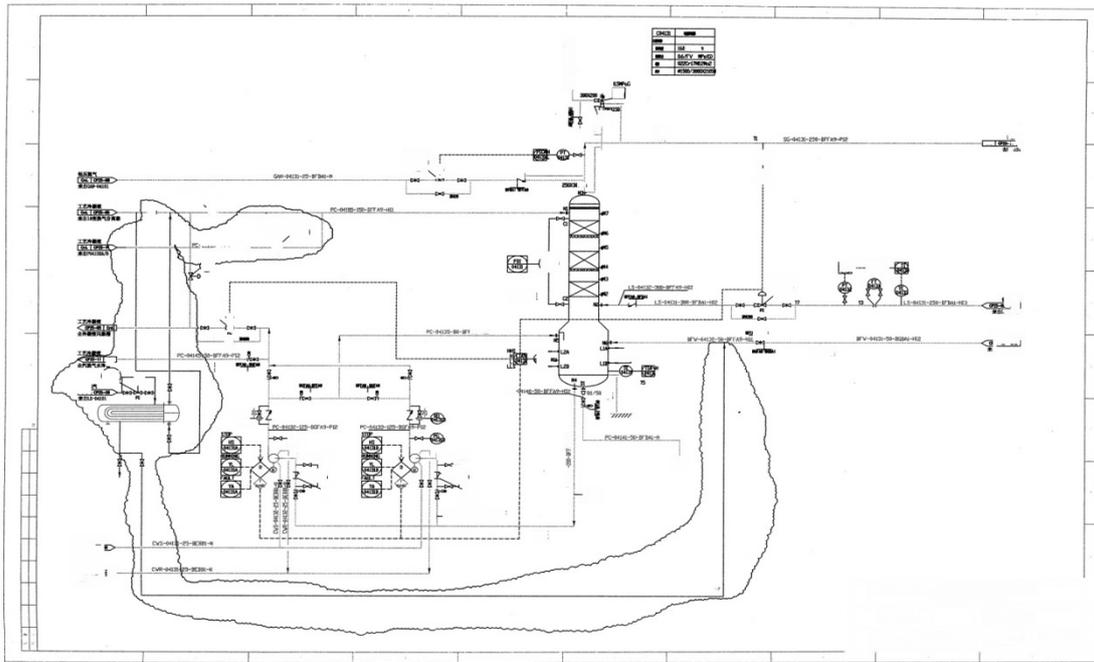
集成蒸汽换热系统：利用低压蒸汽对进入汽提塔的冷凝液进行预热，将温度提升至 60-70℃，以提高汽提效率；

智能回流液调控：在塔顶回流管线上增设调节阀（DN200、DN25），实现液位的远程精准控制；

冷凝液循环利用：将换热器产生的蒸汽冷凝液输送至汽提塔低压锅炉给水系统，实现资源的循环利用。

表 1 原冷凝液中氨氮含量

时间	10:00 氨氮含量 mg/L	16:00 氨氮含量 mg/L	22:00 氨氮含量 mg/L	平均
2023 年 9 月 12 日	12049.91	12118.47	11981.48	12049.95
2023 年 9 月 13 日	11189.90	10841.78	10981.48	11004.38
2023 年 9 月 14 日	11968.85	11797.90	11691.8	11819.51
2023 年 9 月 15 日	10970.36	11213.41	11402.68	11195.48
2023 年 9 月 16 日	11068.38	10666.41	10981.88	10905.55
2023 年 9 月 17 日	12089.90	11995.51	12192.28	12092.56
2024 年 1 月 3 日	11122.37	10855.29	10771.47	10916.37
2024 年 9 月 4 日	11473.11	11666.01	11613.08	11584.06
2024 年 9 月 5 日	11982.07	11876.33	12089.99	11982.79



#### 3.2 主要设备与材料配置

序号	设备名称	规格	数量	单位
1	蒸汽加热器	-	1	台
2	调节阀	DN200	1	只
3	调节阀	DN25	1	只
4	闸阀	DN150	3	只
5	管道	DN150	12	米

#### 3.3 技术亮点

资源高效复用：充分利用原变换煤气换热器，降低设备投资成本；

系统集成优化：将蒸汽冷凝液回收至锅炉给水系统，实现能源的梯级利用；

控制智能化提升：通过远程调节阀提高系统的自动化控制水平。

### 4 项目实施与进度管理

项目于 2023 年 12 月启动可行性调研，2024 年 1 月完成方案编制与立项，2 月通过专家评审。在 2024 年的大修期间，完成了设备安装与系统集成，并于 9 月随装置开车同步投运。具体实施进度如下：

2023年12月：开展可行性研究；  
 2024年1月至3月：进行方案设计、评审与立项；  
 2024年4月至8月：进行设备采购、基础施工与安装；  
 2024年9月：进行系统调试与投运；  
 2024年10月至12月：进行效果验证。  
 2025年1月至3月：优化调整。

## 5 实施效果与深度分析

### 5.1 氨氮去除效果显著

改造后，汽提塔出口冷凝液的氨氮浓度从 12000 mg/L 大幅降至 4000 mg/L 以下，远低于 8000 mg/L 的设计目标值，去除率达到 66.7% 以上。

表 2 原冷凝液中氨氮含量

改造前氨氮含量 mg/L	改造后氨氮含量 mg/L	优化调整氨氮含量 mg/L
12049.95	3914.26	2380.75
11004.38	3577.55	2118.47
11819.51	3496.96	1968.85
11195.48	3717.11	1813.41
10905.55	3652.41	1753.08
12092.56	3851.21	1827.88
10916.37	3445.08	1902.68
11584.06	3442.41	1833.41
11982.79	3345.08	1773.11

### 5.2 系统运行全面改善

仪表堵塞问题得到有效解决，维护频次显著降低；

汽提塔运行稳定性大幅提升，塔顶温度稳定在工艺要求范围内；

能耗与排放双双下降，蒸汽冷凝液的循环利用降低了新鲜水的消耗。

### 5.3 经济效益突出

项目总投资为 34 万元，全部由企业自筹。改造后：  
 减少了因仪表堵塞导致的停车损失；  
 降低了维护成本与环保处理费用；  
 提升了系统运行效率，间接增加了产能效益。

## 6 风险管理与控制措施

在改造过程中，项目组对置换、动火、登高、用电等作业环节进行了全面的风险识别，并制定了针对性的控制措施，如作业前隔离置换、设置警戒线、专业人员监护等，确保了施工安全零事故。

## 7 结语

本次变换汽提塔技术升级通过“预热+智能调控+循环利用”三位一体的技术路径，成功解决了汽提效率低、氨氮超标、仪表堵塞等问题，实现了环保、安全与经济性的有机统一。项目技术方案成熟可靠、实施路径清晰明确、改造效果显著，可为同类型化工装置的改造提供有益的参考。

未来，建议进一步优化系统控制策略，探索与全厂能量管理系统的深度集成，推动装置向智能化、绿色化方向迈进。

### 参考文献

- [1] 云南云天化大为制氮有限公司. 变换汽提改造方案[R]. 2023.
- [2] 变换汽提改造项目专家评审意见[R]. 2024.
- [3] 变换汽提改造项目技术总结报告[R]. 2024.
- [4] 吴欣妍. 合成氨变换过程的节能措施与经济效益分析 [D]. 聊城: 聊城大学, 2025.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 21344-2015 合成氨单位产品能源消耗限额 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

# Common Fault Diagnosis and Treatment Strategy of Steam Turbine in Thermal Power Plant

Yu Wang

State Power Investment Corporation Fushun Liaodian Operation Management Co., Ltd., Fushun, Liaoning, 113007, China

## Abstract

As the core power unit in thermal power plants, the operational stability of steam turbines directly determines the plant's power generation efficiency and safety. Based on practical operational experience, this paper systematically analyzes the root causes of common turbine failures—including vibration anomalies, flow path malfunctions, oil system defects, and seal leaks—while proposing targeted diagnostic methods and practical solutions. The study aims to provide technical references for plant maintenance personnel, enhance turbine operation and maintenance management standards, and ensure the safe and stable operation of power units.

## Keywords

Thermal power plant; Steam turbine; Fault diagnosis; Disposal strategy; Operation and maintenance management

# 火力发电厂汽轮机常见故障诊断与处理策略

王宇

国家电投抚顺辽电运营管理有限公司, 中国·辽宁 抚顺 113007

## 摘要

汽轮机作为火力发电厂的核心动力装置,其运转稳固性径直抉择电厂的发电效能与安全程度。本文融合电厂实际运转阅历,针对汽轮机运转过程中常见的振动异样、通流部位故障、油系统故障以及密封泄漏等状况,深刻剖析故障产生的本源,提出具备针对性的诊断手段与实用化处置策略,目的是为电厂运维人员供给绝对的技术参照,助力提升汽轮机运维管理水准,保障机组安全稳固运转。

## 关键词

火力发电厂; 汽轮机; 故障诊断; 处置策略; 运维管理

## 1 引言

在火力发电体系当中,汽轮机肩负着把蒸汽热能转化成机械能的关键职责,是衔接锅炉与发电机的核心枢纽。随着机组运转时长的延伸,受高温高压工作状况、设备损耗、操作不妥等多种要素作用,汽轮机容易出现各类故障,程度轻的会致使机组降低负荷运转,程度重的会引发停机事故,造成重大经济亏损。目前,部分电厂运维工作当中对故障的诊断大多停留在表面,处置举措缺少针对性。鉴于此,本文结合一线运维实践,深刻剖析汽轮机常见故障的内在成因,总结实用的诊断与处置办法,为电厂高效开展运维工作提供支撑<sup>[1]</sup>。

## 2 汽轮机常见故障诊断基础办法

故障诊断是处置汽轮机问题的前提,一线运位力常用的诊断办法须具备操作简便、针对性强的特征,主要涵盖以下三类:其一为感官诊断办法,运维人员借助看、听、摸等直观形式判断设备状态,例如观察机组运转时的振动情形、听设备运转的声响是否正常、触摸轴承等部位感知温度改变,这种办法无需繁杂设备,能迅速初步判断故障方向;其二为仪器检测办法,借助振动检测仪、油温测试仪、超声波检漏仪等常规装置,对机组关键参数实施精准检测,为故障判断提供可靠根据;其三为历史数据分析对比办法,对比机组正常运转时的参数记录与当前运转数据,结合设备检修历史,排查故障诱因,规避盲目判断<sup>[2]</sup>。

## 3 汽轮机常见故障及具体诊断与处理策略

### 3.1 振动异常故障

#### 3.1.1 故障成因

于实际运行状态之中,振动异常的成因主要涵盖:转子呈现不平衡状态,此多由转子表面产生积垢现象、叶片发

【作者简介】王宇(1983—),男,中国辽宁阜新人,本科,工程师/技师,从事火力发电汽轮机组本体部分,包括汽轮机汽缸、转子、轴瓦等常见的问题及机组振动方面的问题研究。

生磨损或断裂情况、联轴器中心位置出现过大偏差所引发；轴承出现故障问题，诸如轴承间隙呈现过大或过小情形、巴氏合金产生磨损脱落状况、润滑油膜处于不稳定状态等；动静部分产生摩擦现象，因机组升温降温过程的速度过快、转子出现热变形情况、隔板发生变形问题等因素，造成动静间隙逐渐变小，进而引发摩擦状况；基础或台板存在问题，基础产生不均匀沉降现象、台板螺栓出现松动情况，致使机组安装基准发生偏移，在运行过程中产生振动现象<sup>[3]</sup>。

### 3.1.2 诊断方法

运用“感官判断结合仪器检测辅以历史对比”的组合形式：首先借助听觉感知声音，若机组发出具有周期性特征的“嗡嗡”声响，同时通过触摸轴承座感受到较为明显的振动现象，可初步对振动异常情况作出判断；随后使用振动检测仪对轴承座、转子等关键部位的振动幅值与频率进行检测，将检测结果与机组正常运行状态下的振动参数范围进行对比，从而确定振动超出标准的程度；接着查阅机组近期的检修记录文档，若近期实施过转子检修作业或联轴器调整工作，需优先对转子平衡状态与联轴器中心位置问题进行排查；若振动情况伴随负荷变化呈现明显特征，需重点检查动静部分间隙状况与热变形情况<sup>[4]</sup>。

### 3.1.3 处理策略

针对不同的成因采取相应的处理举措：若为转子不平衡问题，需对转子实施清垢处理操作，对叶片的完整性进行检查，在必要情况下开展转子动平衡试验并进行校正作业；对于轴承故障问题，需拆解轴承以检查巴氏合金的磨损情况，对损坏的轴承进行更换，重新调整轴承间隙，以确保润滑油膜处于稳定状态；若存在动静部分摩擦情况，需立即降低机组负荷，减缓升温或降温过程的速度，待机组温度处于稳定状态后检查动静间隙，对发生变形的隔板、转子进行校正或更换处理；针对基础或台板问题，需紧固台板螺栓，对基础沉降部位实施加固处理操作，重新调整机组的安装基准<sup>[5]</sup>。

## 3.2 通流部分故障

### 3.2.1 故障成因

叶片发生损伤情况主要由蒸汽携带的杂质产生冲刷作用、叶片出现疲劳磨损现象、启停过程中温度应力过大所导致；喷嘴出现堵塞情况多因蒸汽品质未能达到标准要求，水垢、杂质在喷嘴通道内发生沉积现象；隔板发生变形问题则是由于长期处于高温高压环境之中，材料出现热疲劳现象、螺栓紧固力不足，进而导致隔板产生翘曲变形情况<sup>[6]</sup>。

### 3.2.2 诊断方法

从运行参数与设备状态两个维度展开工作：若机组出现出力下降、热效率降低的情况，同时伴随振动加剧现象，需重点对通流部分故障进行排查；通过内窥镜对通流通道内部状况进行观察，直接查看叶片是否存在裂纹、磨损现象，喷嘴是否出现堵塞情况，隔板是否发生变形问题；对机组进出口蒸汽参数进行对比分析，若进口蒸汽压力处于正常状态

但出口压力偏低、流量减小，大概率是通流部分发生堵塞或叶片出现损伤所导致<sup>[7]</sup>。

### 3.2.3 处理策略

践行“清理融合修复结合预防”的处置思路：针对喷嘴堵塞状况，于停机之后对通流部分实施拆解操作，运用高压水冲刷或者化学除垢的形式，对喷嘴通道内部的沉积物开展清理作业，与此同时强化锅炉水质的处理事项，防范杂质侵入汽轮机范畴；针对叶片损伤情形，当损伤程度较轻时，对叶片进行打磨处理以及补焊修复工作，当损伤程度严重时，直接对新叶片进行更换操作，完成更换之后需开展动平衡校验流程；针对隔板变形问题，对发生变形的隔板进行校正工序，重新对隔板螺栓实施紧固操作，对隔板密封间隙进行检查，保障其契合运行规范要求<sup>[8]</sup>。

## 3.3 油系统故障

### 3.3.1 故障成因

油温处于过高状态，主要是由冷却器出现堵塞现象、冷却水量处于不足情况、润滑油循环产生不畅问题或者轴承摩擦出现加剧状况所引发；油质产生劣化问题，大多是因蒸汽出现泄漏并进入油系统内部、润滑油长时间使用却未及时进行更换操作、油箱密封不够严密导致杂质或者水分浸入造成；油压呈现异常情形，与油泵出现故障问题、油管发生堵塞或者泄漏现象、溢流阀调节存在不当情况相关联。

### 3.3.2 诊断方法

将油系统参数监测与现场检查工作相融合：借助油温表、油压表对参数变化进行实时监测，当油温超出正常范围、油压出现波动现象或者处于偏低状态时，判定为油系统故障问题；对冷却器进出口水温差进行检查，当温差处于过小状态时，表明冷却器可能发生堵塞情况；提取润滑油样本进行观察，当油色呈现发黑现象、出现沉淀物质或者产生乳化现象时，意味着油质发生劣化问题；在现场对油泵运行声音、油管接头是否存在泄漏情况进行检查，对油泵与管路问题展开排查工作<sup>[9]</sup>。

### 3.3.3 处理策略

对油系统各环节问题进行针对性解决：针对油温过高状况，对冷却器内部的污垢进行清理作业，对冷却水泵运行状况进行检查，保障冷却水量处于充足状态，同时对轴承摩擦状况进行检查，及时对轴承故障问题进行处理；针对油质劣化问题，即刻对合格的润滑油进行更换操作，对油箱与油管路进行清洗作业，对油系统密封状况进行检查，对泄漏部位进行修复操作，防止蒸汽、杂质浸入；针对油压异常情形，对故障油泵进行检修或者更换操作，对堵塞的油管进行清理作业，重新对溢流阀压力进行调节操作，保障油压稳定维持在正常范围之内<sup>[10]</sup>。

## 3.4 密封泄漏故障

### 3.4.1 故障成因

轴端密封产生泄漏问题，大多是由密封片出现磨损现

象、弹簧发生失效问题、转子振动幅度较大导致密封间隙有所增大而引发；隔板密封产生泄漏问题，与隔板出现变形情况、密封件发生老化损坏问题、安装间隙存在不当情况相关联；除此之外，蒸汽压力产生过大波动现象，也会使密封泄漏问题加剧。

### 3.4.2 诊断方法

通过现场观察与简单检测工作进行判断：在现场查看轴端、隔板等密封部位是否存在蒸汽泄漏痕迹，当出现白雾现象、听到泄漏声音时，表明存在密封泄漏问题；运用超声波检测仪对泄漏部位进行检测，精确定位泄漏点位置；将机组效率变化情况相结合，当机组效率出现明显下降现象，并且排除其他故障问题之后，可判定为密封泄漏问题所导致。

### 3.4.3 策略处置

依照泄漏位置和形成原因施行修复办法：针对轴端密封出现泄漏状况，将磨损的密封片和失效的弹簧进行更换操作，对密封间隙开展调整动作，若因转子产生振动而引发问题，则对振动问题同步开展处理事项；就隔板密封发生泄漏情况而言，对隔板的变形现象进行校正工作，把老化的密封件予以更换处理，重新对安装间隙实施调整举措；与此同时，

让蒸汽压力保持稳定状态，防止压力产生波动对密封系统造成冲击影响。

## 4 汽轮机故障防范手段

故障防范作为降低汽轮机故障发生概率的关键所在，结合一线的运维实践经验，能够从以下三个层面着手开展工作：其一，强化日常的巡检维护工作，制定详尽的巡检规划内容，着重对振动、温度、油压等关键参数进行关注操作，及时察觉设备存在的异常迹象情况；定期对冷却器、过滤器实施清理工作，对密封件、轴承等易损耗部件的状态进行检查操作，做到尽早发现问题、尽早处理问题。其二，对机组的启停操作和运行操作进行规范管理，严格依照操作规程对机组的升温速度和降温速度进行控制，避免因热应力过大而导致设备出现变形现象；合理地调整机组的负荷，防止机组长时间处于不稳定的工况条件下运行作业。其三，加强设备全生命周期的管理工作，建立设备的检修档案资料，对设备的运行情况、检修情况、故障处理情况等信息进行记录操作，依据设备的运行年限和运行状态，制定具有针对性的检修规划方案，定期开展全面的检修工作和保养工作。

表 1 汽轮机故障防范工作内容梳理表

防范层面	核心工作要点	工作目标
强化日常巡检维护	制定巡检规划、关键参数监测、易损部件检查、定期清理维护	尽早发现设备问题，及时处理，降低故障隐患
规范机组启停与运行管理	遵守操作规程、控制升降温速度、合理调整负荷、规避不稳定工况	避免热应力过大导致设备变形，保障机组稳定运行
加强设备全生命周期管理	建立检修档案、记录全维度信息、制定针对性检修规划、定期全面检修保养	实现设备全流程可控，延长设备使用寿命，从源头降低故障发生概率

## 5 结语

汽轮机的故障诊断工作和处理工作属于火力发电厂运维工作的核心构成内容，其工作质量会对机组运行的稳定性和经济性产生直接影响。本文针对汽轮机常见的振动异常问题、通流部分故障问题、油系统故障问题以及密封泄漏问题等情况，结合实际的运维实践经验，深入地对故障形成原因进行分析工作，提出了契合实际场景的诊断方式和处置策略内容，并且补充了相应的防范手段。在实际的工作过程当中，运维人员需要结合机组具体的运行状况，灵活地运用各类诊断方式，精确地对故障位置进行定位操作，采取具有针对性的处置措施，同时加强日常的防范维护工作，才能够有效地降低故障的发生概率，保障汽轮机安全稳定地运行作业，为火力发电厂的高效发电工作提供有力的支撑保障。

### 参考文献

[1] 刘东东, 俞昌宸. 汽轮机检修数字化管控平台设计与实现[J]. 科技与创新, 2025, (23): 52-54.  
 [2] 张余辉. 火力发电厂生产现状及降耗优化措施分析[J]. 中国设

备工程, 2025, (23): 89-91.  
 [3] 杨换凌. 火力发电厂汽轮机设备常见故障及检修措施[J]. 价值工程, 2025, 44 (35): 146-148.  
 [4] 杨博文. 发电厂锅炉和汽轮机组的协调控制系统分析[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32 (11): 145-147+150.  
 [5] 宋炬赫, 张海军. 火力发电厂热电联产系统优化调度技术探讨[J]. 科技视界, 2025, 15 (31): 100-103.  
 [6] 刘勇刚. 火力发电厂集控运行节能降耗技术措施探析[J]. 灯与照明, 2025, 49(01): 167-169+173.  
 [7] 张海. 火力发电厂锅炉和汽轮机组协调控制技术[J]. 电力设备管理, 2024, (24): 81-83.  
 [8] 王阳杰. 火力发电厂热能动力装置自动检测技术[J]. 自动化应用, 2024, 65(23): 120-122.  
 [9] 李传海, 葛云双, 翟观文. 火力发电厂汽轮机设备安装检修技术分析[J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 181-183.  
 [10] 李宏海. 火力发电厂汽轮机油系统常见故障原因及防控措施[J]. 科技资讯, 2024, 22(18): 201-203.

# The synergistic application and mechanical property analysis of new wall materials and cement-based composite materials

Yijun Su

Dali Science and Technology Achievement Transformation Center, Dali, Yunnan, 671000, China

## Abstract

With the increasing demand for green, environmentally friendly and energy-saving materials in the construction industry, the application of new wall materials and cement-based composite materials has gradually received attention. The main wall materials in Yunnan Province include autoclaved aerated concrete blocks, ordinary concrete small hollow blocks, sintered perforated bricks and solid concrete bricks. These materials play an important role in building energy conservation and structural safety. This paper explores the synergistic application of new wall materials and cement-based composite materials, and analyzes their mechanical properties and their impact on building structures. Research shows that through reasonable material ratios and optimized production processes, the combined application of the two can effectively enhance the compressive strength, sound insulation and thermal insulation of walls, and reduce carbon emissions, promoting the green development of the construction industry.

## Keywords

New wall materials; cement-based composite materials; synergistic application; mechanical properties; Yunnan Province

## 新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用及力学性能分析

苏益军

大理市科技成果转化中心, 中国·云南大理 671000

## 摘要

随着建筑行业对绿色、环保和节能材料需求的增加, 新型墙体材料与水泥基复合材料的应用逐渐受到重视。云南省的主要墙体材料包括蒸压加气混凝土砌块、普通混凝土小型空心砌块、烧结多孔砖和混凝土实心砖, 这些材料在建筑节能和结构安全性方面具有重要作用。本文探讨了新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用, 分析了其力学性能及对建筑结构的影响。研究表明, 通过合理的材料配比和优化生产工艺, 二者的协同应用能有效提高墙体的抗压强度、隔音性和保温性, 并能减少碳排放, 推动建筑行业的绿色发展。

## 关键词

新型墙体材料; 水泥基复合材料; 协同应用; 力学性能; 云南省

## 1 引言

随着全球建筑能效和环保要求的提升, 绿色建筑材料的需求日益增长。墙体材料直接影响建筑物的结构稳定性、热隔离、声学性能及抗震性, 尤其在不同气候条件下, 对建筑的节能效果有着显著影响。云南省主要墙体材料包括蒸压加气混凝土砌块、普通混凝土小型空心砌块、烧结多孔砖和混凝土实心砖, 各有其优劣。水泥基复合材料通过掺加矿物掺合料、增强纤维等改善传统水泥的性能, 并可与新型墙体材料协同应用, 进一步提升墙体性能, 如抗压强度、抗裂性、保温性及隔音效果。本文结合云南省的实际情况, 探讨二者的协同应用及其力学性能, 旨在推动绿色建筑材料的广泛应用, 助力绿色建筑健康发展。

【作者简介】苏益军(1968—), 男, 白族, 中国云南大理人, 本科, 工程师, 从事经济, 法律研究。

## 2 新型墙体材料的种类与特点

### 2.1 蒸压加气混凝土砌块

蒸压加气混凝土砌块(AAC)是一种以砂子为主要原料, 经过高温蒸压养护而成的轻质墙体材料。该材料具有较低的密度, 良好的保温、隔音性能, 且具有较高的抗压强度和耐火性。蒸压加气混凝土砌块的主要优势在于其低热传导率, 使得建筑在夏季能够保持较低的温度, 在冬季则保持温暖, 从而具有显著的节能效果。此外, 蒸压加气混凝土砌块的生产工艺相对环保, 能够有效减少建筑能耗和温室气体排放。其轻质特性使得建筑整体重量较轻, 减轻了建筑结构的负担, 施工便捷。由于其良好的耐火性, 蒸压加气混凝土砌块能在火灾中提供安全保障, 因此在多层建筑中得到广泛应用。除了作为墙体材料, 蒸压加气混凝土砌块还可作为内外墙保温材料, 应用于住宅、商业建筑以及公共设施等领域。其可回收性和低能耗的生产过程符合绿色建筑的标准, 适应

了节能环保的需求。

## 2.2 普通混凝土小型空心砌块

普通混凝土小型空心砌块由水泥、砂、石及水通过高压混合而成，砖体内部形成了大量气孔，从而降低了其密度，增强了热隔离和保温性。该类砖的力学性能较好，能够承受较大的压力，同时具备较强的隔音效果。普通混凝土小型空心砌块的优点在于其高强度、耐久性以及较强的抗压能力，能够满足建筑墙体和外立面在高负荷条件下的应用需求。其多孔结构不仅提升了保温性，还增加了空气流通性，对改善建筑的室内环境有一定的帮助。此外，普通混凝土小型空心砌块的生产工艺较为简单，原料成本低，生产周期短，因此在很多建筑工程中得到了广泛应用。虽然其隔热性较好，但相较于其他新型墙体材料，重量相对较大，可能会影响施工效率，尤其在大型建筑中，材料的运输和施工过程中可能会增加成本。因此，在应用过程中需要综合考虑其优缺点，根据具体情况做出选择。

## 2.3 烧结多孔砖

烧结多孔砖是一种通过高温烧结形成的多孔砖，具有较高的强度和良好的保温性能。该砖的生产工艺简单，材料来源广泛，成本较低，因此在云南省及全国范围内得到广泛应用。烧结多孔砖具有较好的力学性能，能够承受较大的负荷，同时其透气性和隔音效果也较为突出。烧结多孔砖的优点在于其生产过程相对环保，且采用了自然矿物质作为原料，减少了资源浪费。该材料广泛应用于住宅、商业建筑以及低层建筑项目中。然而，相较于蒸压加气混凝土砌块，烧结多孔砖的热隔离效果和保温性能稍逊色，尤其在高寒地区的应用可能不如蒸压加气混凝土砌块。因此，烧结多孔砖通常用于低层建筑、非承重墙体或临时性建筑结构，在云南省的建筑中主要应用于农村住宅或低层商业建筑，适用于对保温性要求不高的场合。

## 2.4 混凝土实心砖

混凝土实心砖以水泥和砂石为主要原料，具备高抗压强度与强结构稳定性，在建筑领域，尤其是承重墙体中应用广泛。它强度高、耐久性好，能有效承载建筑结构重量，是高层建筑及承重墙体的理想之选。同时，其生产成本低、工艺成熟，进一步推动了在建筑中的普遍应用。

然而，混凝土实心砖也存在明显缺点，热传导率高、保温性能差，在夏冬两季，建筑内部温度较难调控。为提升能源效率，常需搭配保温层、隔热涂层等隔热材料使用。另外，因其重量较大，施工时要充分考虑对建筑结构的压力影响，所以它更适用于需强结构支撑的建筑，并非所有建筑类型都适用。在高层建筑和大跨度结构中，它能提供更可靠的支撑与稳定性。

# 3 水泥基复合材料的特性与优化设计

## 3.1 水泥基复合材料的构成

水泥基复合材料是由水泥、矿物掺合料（如粉煤灰、

矿渣、硅灰等）、增强纤维（如钢纤维、玻璃纤维、聚丙烯纤维等）以及其他辅助材料组成的建筑材料。矿物掺合料作为一种绿色环保材料，能够改善水泥的流动性和凝固性能，同时在生产过程中减少水泥的使用，降低碳排放。粉煤灰、矿渣等材料的加入，不仅能够提高水泥基复合材料的抗压强度，还能增强其耐久性和抗老化性能。增强纤维的加入，使得水泥基复合材料在抗拉强度、韧性和抗裂性方面得到了显著提升，尤其是在混凝土中加入钢纤维和玻璃纤维后，能有效提高材料的抗裂性和抗冲击能力。此外，聚丙烯纤维的加入可以改善水泥基复合材料的防裂性能和耐火性能，进一步增强其在极端条件下的稳定性。这些优化设计和复合材料的创新为建筑结构提供了更高的强度、更好的耐久性以及更广泛的适用性。

## 3.2 水泥基复合材料的性能优势

水泥基复合材料相较于传统水泥材料，具有显著的性能优势。首先，水泥基复合材料的抗压、抗拉和抗裂性能得到显著增强，这使得其能够承受更大的负载，特别适合于大跨度和高强度的建筑结构。通过矿物掺合料的优化应用，水泥基复合材料的抗渗性、耐高温性和耐腐蚀性得到了大幅提升，确保了在各种环境下的长期使用稳定性。此外，水泥基复合材料的耐久性较高，即使在长期使用过程中，材料的性能依旧保持稳定，不容易发生老化或破裂，从而大大延长了建筑的使用寿命。在防水和抗腐蚀性方面，水泥基复合材料在桥梁、隧道等结构中具有极高的优势，尤其在对抗湿气和化学侵蚀的环境中，表现出优异的耐久性能。通过进一步优化材料配比和生产工艺，水泥基复合材料的强度和韧性能够满足不同建筑项目的需求，尤其适用于对结构强度和耐久性要求较高的建筑项目。

## 3.3 水泥基复合材料的应用领域

水泥基复合材料在建筑、道路、桥梁等多个领域都有着广泛的应用。随着建筑节能要求的提升，水泥基复合材料在墙体材料中的应用也日益增多，尤其是在高强度、抗裂性和保温隔热等方面需求较高的建筑项目中，水泥基复合材料成为了理想选择。在建筑墙体中，水泥基复合材料具有较好的抗裂性和强度，使得其在承重墙体和隔墙中的应用效果尤为突出。通过水泥基复合材料的应用，墙体不仅具备更好的抗压强度和稳定性，还能有效提高其抗震能力，确保建筑结构的安全性。随着低碳环保理念的推广，水泥基复合材料的绿色生产工艺逐渐得到应用，特别是采用工业废渣和可再生材料作为掺合料后，材料的环保性能得到显著提升。在桥梁和道路的建设中，水泥基复合材料通过提升其抗拉强度和耐腐蚀性能，进一步延长了结构的使用寿命，并且在桥梁的耐久性和抗震性方面展现了较大的优势。此外，水泥基复合材料在预制构件、隧道以及海洋工程中也有着广泛的应用，通过优化设计和创新工艺，不仅提高了结构的承载能力，还提升了整体工程的安全性和稳定性。

## 4 新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用

### 4.1 协同应用的优势分析

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用能够显著提升建筑的综合性能，满足不同建筑项目的多重需求。合理搭配这些材料，可以兼顾墙体的强度、保温、隔音、抗震等多方面的需求。例如，蒸压加气混凝土砌块与水泥基复合材料结合，可以有效提升墙体的保温隔热性能，同时保持较高的强度，而不牺牲结构的稳定性。这种结合不仅提高了墙体的热隔离效果，还能在低能耗建筑中起到至关重要的作用，帮助建筑达到节能标准。另一方面，普通混凝土小型空心砌块和烧结多孔砖与水泥基复合材料结合后，可以进一步增强墙体的抗压强度和耐久性。通过在传统材料中加入水泥基复合材料，墙体的抗裂性能得到了改善，能够有效防止因长期使用或外界环境变化带来的裂缝，满足建筑结构和外立面的多样化需求。这种协同应用方式既保证了材料性能的提升，又为建筑行业提供了更加环保、绿色的解决方案。

### 4.2 协同应用的力学性能提升

通过在新型墙体材料中添加水泥基复合材料，能够显著改善墙体的力学性能，特别是在抗压强度和耐久性方面。水泥基复合材料的增强纤维，如钢纤维、玻璃纤维等，能够有效提高墙体的抗拉强度和抗裂性，减少长期使用过程中裂缝的产生。这一效果在高层建筑和特殊结构中尤为明显，因为这些建筑对材料的抗压强度、抗拉强度和整体稳定性有较高的要求。水泥基复合材料的添加，增强了墙体的整体稳定性和抗震性，能够使墙体承受更大的外部负荷，特别是在地震多发地区或高风压环境下，展现出更好的力学性能。此外，复合材料的加入增强了材料的延展性和韧性，改善了墙体的抗冲击能力，提升了建筑的安全性。在实际应用中，这种协同效果不仅提升了建筑的力学性能，还降低了墙体的生产成本，使得新型墙体材料与水泥基复合材料的结合具有更高的性价比。

### 4.3 协同应用的环境效益

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用不仅有助于提高建筑性能，还能够一定程度上降低环境影响，推动

建筑行业的绿色转型。通过优化原材料的配比，合理选择绿色原料并采用低碳生产工艺，可以显著减少生产过程中的能源消耗和碳排放。例如，使用工业废渣（如粉煤灰、矿渣等）作为矿物掺合料，不仅能够减少水泥的使用量，还能有效降低碳排放。这些废弃物的回收利用不仅有助于减少资源浪费，还能减少生产过程中温室气体的排放，为建筑行业的低碳发展提供支持。此外，通过结合绿色生产工艺，如低能耗搅拌、优化烧结过程等，能够进一步降低生产过程中的能源消耗，并减少废弃物的产生，确保建筑材料在生产、使用和废弃过程中具有较小的环境影响。使用这些绿色墙体材料的建筑，不仅能够减少能耗，还能提供更舒适的居住环境，助力可持续发展目标的实现。

## 5 结语

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用为建筑行业提供了一种绿色、可持续的材料选择。在提升墙体综合性能的同时，能够减少环境负担，推动建筑行业朝着低碳、环保方向发展。本文通过对云南省新型墙体材料和水泥基复合材料的分析，提出了两者协同应用的优化路径，并通过力学性能的提升、环境效益的减少等方面的探讨，为绿色建筑的发展提供了理论支持和实践指导。随着技术的进步和市场需求的变化，未来新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用将在建筑行业中发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 朱国涛.融入含菌建筑复合材料的建筑填充材料成型及性能研究[J].太原学院学报(自然科学版),2025,43(01):26-31.
- [2] 李秋利,赵光明,王艳芬,等.玻纤粉改性粉煤灰-水泥复合注浆材料水化产物与工程特性试验研究[J/OL].煤炭学报,1-16[2025-06-26].
- [3] 夏修建,于永金,齐奉忠,等.固井用纳米材料及纳米复合材料研究进展[J].油田化学,2024,41(04):725-737.
- [4] 杨晓庆,魏发云,阳知乾,等.不同工程参数下聚甲醛纤维/聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料的压缩性能[J].东华大学学报(自然科学版),2025,51(02):70-76.

# Innovative Exploration of the “Three Standardizations” Training and Assessment System for Special Equipment Operators

Xiaoyu Xia Yi Tian Ningning Chen

Chongqing Jinzhi Vocational Training School, Chongqing, 401147, China

## Abstract

The optimization and innovation of the training and assessment system for special equipment operators are the core support for enhancing industry safety governance efficiency and ensuring the stable operation of special equipment. As a key component of special equipment safety management, the "Three-Standardization" (Standardization, Normalization, and Informatization) training and assessment system has established a relatively mature operational framework by deeply integrating the "Three-Standardization" concept throughout the entire process. However, the current system still faces issues such as insufficient standard refinement, poor process coordination, and inadequate technological empowerment. It is imperative to improve the standard system, standardize implementation procedures, and strengthen technological integration to comprehensively enhance the quality of training and assessment, thereby facilitating the iterative upgrading of the special equipment safety management system. Based on the current industry landscape, this paper focuses on the innovative pathways of the "Three-Standardization" training and assessment system, proposes targeted optimization strategies, and provides theoretical references and technical guidance for industry practice.

## Keywords

Special equipment; Operators; Three-Standardization Training; Assessment System; Safety Governance

## 特种设备作业人员三化培训考核体系创新探讨

夏晓予 田易 陈宁宁

重庆市金质职业培训学校, 中国·重庆 401147

## 摘要

特种设备作业人员培训考核体系的优化与创新, 是提升行业安全治理效能、保障特种设备平稳运行的核心支撑。“三化”(标准化、规范化、信息化)培训考核体系作为特种设备安全管理的核心构成, 通过将“三化”理念深度融入培训考核全流程, 已构建起相对成熟的运行框架。但当前体系仍存在标准细化不足、流程衔接不畅、技术赋能不充分等问题, 亟需通过完善标准体系、规范实施流程、强化技术融合等举措, 全面提升培训考核质量, 助力特种设备安全管理体系迭代升级。本文立足行业现状, 聚焦“三化”培训考核体系创新路径, 提出针对性优化策略, 为行业实践提供理论参考与技术指引。

## 关键词

特种设备; 作业人员; 三化培训; 考核体系; 安全治理

## 1 引言

随着特种设备行业快速发展, 对作业人员专业素质与安全素养的要求日趋严格, 全流程安全作业成为行业高质量发展的核心目标。行业安全规范与技术标准的持续更新, 推动培训考核体系动态优化, 愈发成为特种设备安全管理领域的研究与实践重点。“三化”(标准化、规范化、信息化)培训考核体系作为特种设备安全管理的核心构成, 将“三化”理念融入培训、考核、评估全流程, 为提升培训质量、强化作业人员安全意识提供了有效支撑, 契合行业发展趋势。但

实际运行中, 培训工作仍存在标准体系不完善、考核流程不规范等短板, 现有体系面临培训内容碎片化、考核方式单一化、信息共享不充分、监管机制不健全等问题, 不仅导致培训考核效率低下、资源浪费, 更加剧了特种设备运行安全风险, 亟待系统性破解。现有体系的核心症结在于科学性与系统性不足: 标准化建设滞后, 存在标准缺失、细化不足或执行不到位问题; 规范化流程存在断点堵点, 各环节协同衔接不畅; 信息化技术与培训考核场景融合深度不够。因此, 探索“三化”培训考核体系创新路径, 优化培训考核模式与实施措施, 对强化特种设备安全管理、提升作业人员综合素质具有重要现实价值。

【作者简介】夏晓予(1982—), 女, 中国重庆人, 本科, 助理工程师、企业培训师。

## 2 三化培训考核体系创新的意义

### 2.1 提升培训质量，夯实人才根基

“三化”培训考核体系以科学规划为前提，对培训内容系统性与考核标准严谨性提出更高要求。特种设备作业人员培训涉及理论知识、实际操作与安全规范三大核心模块，需多部门协同联动。在“三化”体系支撑下，可实现培训内容系统化整合、标准化组织实施与规范化过程管控，有效规避传统培训内容碎片化、针对性不足等弊端，显著提升培训质量。通过标准化课程体系、规范化教学流程与信息化教学手段，推动作业人员整体素质全面提升，为行业安全发展筑牢人才根基。

### 2.2 优化考核流程，提升考核效能

“三化”培训考核体系以标准化流程为核心，推动考核方式优化升级。与传统模式相比，体系通过规范化管理明确考核各环节权责边界与操作标准，借助信息化技术将报名审核、题库抽题、过程监控、成绩核算等重复性、程序性工作交由系统自动完成，仅需少量人工把控关键环节，大幅降低人为干预成本，提升考核效率与结果的公正性、准确性。其完善的运行机制，为培训考核工作规范化、高效化推进提供了可靠保障。

### 2.3 强化风险防控，助力安全管理升级

当前特种设备安全形势日趋严峻，“三化”培训考核体系的引入可有效提升安全管理规范化水平。通过标准化风险辨识流程、规范化安全操作培训与信息化风险监控手段，推动安全风险防控标准化、规范化运作，为特种设备平稳运行提供坚实保障。该体系搭建起培训考核与安全管理的衔接桥梁，通过标准化流程与规范化操作，能提升作业人员安全意识与风险防控能力，进而提升行业整体安全管理水平，推动特种设备安全管理体系持续完善。

## 3 三化培训考核体系现存问题

### 3.1 标准化建设滞后，实施效能不足

“三化”培训考核体系的标准化建设存在明显短板，难以契合行业发展与安全管理实际需求。一方面，标准体系不完善，不同类型特种设备、不同作业岗位的专项培训考核标准缺失或细化不足，导致企业、地区间考核标准差异较大，统一性与公正性难以保障；另一方面，部分企业对标准化培训考核重视不足，存在“重形式、轻实效”的认知偏差，未严格执行相关标准，阻碍“三化”理念落地。此外，标准执行监督机制不健全，缺乏有效约束与惩戒措施，进一步降低了标准化体系实施效能。

### 3.2 规范化流程缺失，各环节衔接不畅

“三化”培训考核的有效实施依赖完善流程支撑，但当前体系普遍存在流程不清晰、环节衔接不畅等问题。具体表现为：培训内容设计、教学实施、考核组织、成绩评估等环节权责划分不明确，存在交叉重叠或责任真空；考核标准

不统一，对理论知识、实操技能的考核权重与评价维度缺乏科学界定，考核结果差异较大；培训与考核衔接机制不完善，缺乏培训效果动态评估与反馈，导致二者脱节；考核结果应用机制不健全，未形成“培训-考核-整改-提升”闭环管理，导向作用未充分发挥。

### 3.3 信息化融合不深，技术赋能作用有限

信息化是“三化”体系的核心支撑，但当前培训考核与信息化应用存在明显脱节。一方面，信息化平台建设滞后，部分地区与企业仍依赖传统线下模式，缺乏统一管理平台，导致考核数据采集不及时、不完整，信息共享不充分，形成“信息孤岛”；另一方面，信息化技术应用深度不足，现有平台多仅具备报名、缴费、成绩查询等基础功能，未充分运用大数据、人工智能、VR等先进技术开展沉浸式培训、智能化考核与风险预警，难以满足个性化培训与精准化安全管理需求。此外，数据安全管理机制不完善，存在数据失真、泄露等风险，给行业安全管理带来隐患<sup>[1]</sup>。

## 4 三化培训考核体系创新策略

### 4.1 完善标准化体系，强化标准引领作用

立足行业实际，构建科学、系统、可操作的标准体系。一是强化顶层设计，结合不同特种设备技术特点与作业岗位要求，制定针对性强、细化程度高的专项培训考核标准，明确培训内容、考核指标、评价维度与合格标准，实现“一岗一标准、一机一规范”；二是加强标准宣贯与执行监督，通过专题培训、行业研讨提升认知度与执行力，建立常态化监督机制，对落实不到位的企业约谈、限期整改，情节严重的依法处罚；三是建立标准动态更新机制，密切关注行业技术发展与安全规范更新，及时修订完善标准，确保科学性与时效性。

### 4.2 规范实施流程，构建闭环管理机制

以规范化为核心，优化培训考核全流程，构建“培训-考核-评估-整改-提升”闭环机制。一是明确各环节权责边界，制定标准化流程操作手册，界定各方权利与义务，确保环节衔接有序、责任到人；二是优化培训与考核衔接流程，建立培训效果动态评估机制，根据评估结果调整培训内容与方法，强化考核对培训的导向作用；三是健全考核结果应用机制，将考核结果作为作业人员上岗、晋升、评优的重要依据，对不合格人员强制补训补考，对存在严重安全隐患的人员暂停上岗资格，形成“以考促学、以考促练”的良好氛围<sup>[2]</sup>。

### 4.3 深化信息化融合，提升技术赋能水平

以信息化为抓手，推动培训考核模式创新，充分发挥技术赋能作用。一是构建统一的信息化管理平台，整合培训报名、教学实施、考核组织、成绩管理、证书核发、信息查询等功能，实现培训考核全流程线上化管理，打破“信息孤岛”，推动地区间、企业间的信息共享与协同联动；二是强

化先进技术应用,运用大数据技术分析培训考核数据,精准识别培训薄弱环节与安全风险点,为个性化培训方案制定与精准化安全管理提供数据支撑;运用VR/AR技术构建沉浸式培训场景,模拟特种设备故障处置、应急救援等实操环节,提升培训的趣味性与实效性;运用人工智能技术开展智能化考核,通过视频监控、行为识别等手段实现考核过程的全程留痕与自动评判,提升考核的公正性与效率;三是加强数据安全,建立健全数据采集、存储、传输、应用全流程的安全管理制度,采用加密存储、身份认证、权限管控等技术手段保障数据安全,确保考核数据的真实性、完整性与安全性<sup>[3]</sup>。

#### 4.4 优化培训考核模式,提升培训考核质量

以提升培训考核质量为核心,创新培训考核模式,满足行业多样化需求。一是推行“理论+实操+情景模拟”的多元化培训模式,在传统理论教学与实操演练的基础上,增加应急处置情景模拟、典型事故案例分析等内容,提升作业人员的安全意识与应急处置能力;二是开展个性化培训,根据作业人员的岗位特点、知识结构与能力短板,通过信息化平台推送定制化培训课程,实现“因材施教”;三是创新考核方式,采用“线上理论考核+线下实操考核+智能化过程考核”相结合的方式,线上考核侧重理论知识的系统性检验,线下考核侧重实操技能的规范性评估,智能化过程考核通过信息化平台实时监测作业人员的操作行为,实现对考核过程的全程管控与精准评判;四是加强培训师队伍建设,建立师资准入、培训、考核与退出机制,选拔具备丰富实操经验与教学能力的行业专家、技术骨干充实师资队伍,提升培训教学质量<sup>[4]</sup>。

#### 4.5 建立长效保障机制,推动体系持续优化

“三化”培训考核体系的创新与完善是一项系统工程,需建立健全长效保障机制,确保体系持续优化、有效运行。一是加强组织保障,建立由市场监管部门、行业协会、企业代表组成的协同推进机制,明确各主体的职责分工,统筹推进培训考核体系的建设与优化;二是强化政策与资金支持,出台针对性的扶持政策,鼓励企业加大对“三化”培训考核体系建设的投入,对信息化平台建设、先进技术应用等给予专项补贴,降低企业负担;三是建立体系动态评估与优化机制,定期组织行业专家、企业代表对“三化”培训考核体系的运行效果进行评估,结合行业技术发展、安全规范更新与实践反馈,及时调整优化体系架构、标准流程与技术应用,确保体系的科学性、适应性与先进性;四是完善激励约束机制,对在“三化”培训考核体系建设与应用中成效显著的企业与个人给予表彰奖励,对重视不足、落实不力的企业进行

通报批评,形成正向激励与反向约束相结合的推进格局<sup>[5]</sup>。

#### 4.6 构建综合评价体系,提升体系运行效能

构建科学的综合评价体系是提升“三化”培训考核体系运行效能的关键,需突破传统单一考核结果评价的局限,建立多维度、全流程的综合评价机制。一是明确评价主体与评价指标,评价主体涵盖市场监管部门、行业协会、企业、培训考核机构与作业人员,形成多元化评价格局;评价指标应包括标准完善度、流程规范性、信息化水平、培训质量、考核公正性、安全管理成效等核心维度,细化具体评价指标与权重;二是创新评价方法,采用定量评价与定性评价相结合、过程评价与结果评价相结合的方式,通过信息化平台采集培训考核数据、企业安全管理数据等定量指标,通过问卷调查、专家评审、现场核查等方式获取定性指标,确保评价结果客观、全面;三是强化评价结果应用,将综合评价结果作为体系优化、政策调整、机构资质认定的重要依据,针对评价中发现的问题制定专项整改方案,推动“三化”培训考核体系持续完善,提升体系运行效能。

### 5 结语

“三化”培训考核体系创新是提升特种设备作业人员素质、强化行业安全管理的核心举措,直接关系到特种设备运行安全与行业高质量发展。当前体系仍存在标准化建设滞后、规范化流程不完善、信息化融合不深等问题,需通过完善标准体系、规范实施流程、深化信息化融合、优化培训考核模式、建立长效保障机制与综合评价体系等策略,推动体系不断完善。

未来,随着行业技术发展与安全要求提升,“三化”培训考核体系需持续迭代优化,进一步强化标准引领、流程管控与技术赋能,构建“标准科学、流程规范、技术先进、管理高效”的培训考核体系,全面提升培训考核质量与安全管理水平,为特种设备行业安全高质量发展提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1] 申伟,曾汉生,张金才.特种设备作业人员职业技能大赛激励作用研究[J].大众文摘,2024(26):0042-0044.
- [2] 张金才,曾汉生,申伟,等.特种设备作业人员安全教育培训策略研究[J].区域治理,2024(29):0213-0215.
- [3] 隆立勇,闫富强,肖晖.关于特种设备检验检测安全问题的研究[J].中国地名,2025(1):0034-0036.
- [4] 辛文环.基于数据分析的特种设备管理体系评估[J].黑龙江科学,2025,16(4):153-155.
- [5] 邓勇军,段成.水利工程施工特种设备作业人员管理研究[J].四川水利,2024,45(S2):142-144.

# Optimization of Medium and Deep Hole Blasting Parameters and Blasting Effect Control Technology

Huaiyu Liu

Zijin Mining Co., Ltd., Wulate Back Banner, Bayannur, Inner Mongolia, 015500, China

## Abstract

As a core technology in mining, infrastructure construction, and related engineering fields, the scientific design of parameters for medium-deep hole blasting directly determines blasting efficiency, construction safety, and economic costs. In recent years, with the advancement of intelligent blasting technology, parameter optimization has shifted from empirical design to an integrated approach combining "theoretical calculation, numerical simulation, and field testing." This paper addresses the key challenges in parameter design for medium-deep hole blasting. By integrating test results of rock mass physical and mechanical parameters, it focuses on optimizing critical indicators such as hole diameter, depth, hole network parameters, and explosive consumption. Additionally, it proposes supporting technical measures like vibration control and flying rock protection, providing technical references for similar projects.

## Keywords

medium-deep hole blasting; parameter optimization; rock mass classification; blasting vibration; effect control

## 中深孔爆破参数优化及爆破效果控制技术

刘怀宇

乌拉特后旗紫金矿业有限公司, 中国·内蒙古 巴彦淖尔 015500

## 摘要

中深孔爆破作为矿山开采、基建施工等工程领域的核心技术,其参数设计的科学性直接决定爆破效率、施工安全及经济成本。近年来,随着智能爆破技术的发展,参数优化已从经验设计转向“理论计算-数值模拟-现场试验”的一体化模式。本文针对中深孔爆破参数设计的核心难点,结合岩体物理力学参数测试结果,重点优化孔径、孔深、孔网参数、炸药单耗等关键指标,同时提出振动控制、飞石防护等配套技术措施,为同类工程提供技术借鉴。

## 关键词

中深孔爆破; 参数优化; 岩体分级; 爆破振动; 效果控制

## 1 引言

中深孔爆破凭借钻孔深度大(通常5-20m)、单次爆破方量大、作业效率高的优势,已广泛应用于露天矿山剥离与采矿、公路铁路路基开挖、水利枢纽基坑施工等工程场景。与浅孔爆破相比,中深孔爆破能有效减少钻孔工作量、降低爆破次数,但其爆破能量传递路径复杂,受岩体不均质性、参数匹配度等因素影响显著,易出现大块率过高、爆破振动超标、飞石距离失控等问题,不仅增加后续破碎成本,还可能引发安全事故。

## 2 中深孔爆破技术特征及影响因素

### 2.1 技术特征分析

中深孔爆破的核心特征体现在“深孔”带来的能量分布差异:其一,钻孔深度增加导致炮孔间应力叠加效应显著,

合理的孔网参数可实现能量均匀传递,避免出现应力集中或爆破盲区;其二,深孔爆破的炸药装药长度大,装药结构对爆破效果影响突出,连续装药适用于均质硬岩,间隔装药则可降低软岩区域的过度破碎;其三,深孔爆破的自由面控制难度大,需通过合理设置起爆顺序,创造多向自由面以提高破碎效率。

与浅孔爆破相比,中深孔爆破的单位爆破成本降低30%-50%,但对参数设计的精度要求更高。例如,孔距偏差超过10%就可能导​​致大块率上升20%以上,炸药单耗每增加0.1kg/t,将使每吨矿石开采成本增加0.5-0.8元。因此,参数优化是中深孔爆破技术的核心环节。

### 2.2 影响因素

影响参数优化的核心因素主要包括三类:一是岩体自身特性,如岩石的抗压强度、抗拉强度、岩体完整性系数、节理裂隙发育程度等,这些参数直接决定了岩体的抗爆能力和破碎难度;二是工程技术要求,不同工程对爆破后岩石的块度分布、开挖边坡稳定性、周边构筑物的安全距离等均有

【作者简介】刘怀宇(1992—),男,中国内蒙古巴彦淖尔人,本科,工程师,从事采矿研究。

明确规定,是参数优化的约束条件;三是爆破器材性能,炸药的爆速、爆力、猛度,雷管的延期精度、起爆可靠性等,直接影响爆破能量的释放规律和传递效率,是参数设计的物质基础。在优化过程中,需将三者有机结合,通过理论计算、数值模拟与室内试验相结合的方法,实现参数的科学配置<sup>[1]</sup>。

### 3 中深孔爆破核心参数优化方法

#### 3.1 参数优化的核心原则

中深孔爆破参数优化需遵循“岩体适配、安全高效、经济合理”三大原则:一是根据岩体分级结果确定参数基准值,避免“一刀切”式设计;二是将爆破振动、飞石等安全指标作为约束条件,确保参数设计符合安全规范;三是综合考虑钻孔成本、炸药成本及后续破碎成本,实现总成本最低化。同时,参数优化需采用“正向设计-反向验证”的闭环模式,通过现场试验修正理论计算结果。

#### 3.2 关键参数优化设计

##### 3.2.1 孔径与孔深优化

孔径( $d$ )与孔深( $L$ )是中深孔爆破的基础参数,需结合钻孔设备能力、岩体特性及爆破任务确定。孔径选择需匹配炸药直径,通常炸药直径为孔径的0.6-0.8倍,以保证装药密度。对于露天矿山,常用孔径为90-150mm,其中90mm孔径适用于中硬岩( $R_c=30-60\text{MPa}$ ),150mm孔径适用于硬岩( $R_c > 60\text{MPa}$ )。

孔深优化需区分垂直孔与倾斜孔:垂直孔孔深= $L_1+L_2$ ,其中 $L_1$ 为台阶高度, $L_2$ 为超深,超深通常取台阶高度的10%-15%,用于克服底盘抵抗过大导致的根底问题;倾斜孔(倾角 $70^\circ-85^\circ$ )孔深= $L_1/\sin\theta+L_2$ ( $\theta$ 为孔倾角),倾斜孔可减少大块率,但钻孔效率较低。例如,某铁矿台阶高度12m,岩体为II级硬岩,采用110mm垂直孔,超深取1.5m,孔深设计为13.5m,有效避免了根底残留。

##### 3.2.2 孔网参数优化

孔网参数包括孔距( $a$ )、排距( $b$ )及底盘抵抗线( $W_d$ ),是决定爆破效果的核心指标,三者需满足 $a/b=1.2-1.5$ (菱形布孔)或 $a/b=1.0-1.2$ (矩形布孔)的比例关系,以实现应力均匀叠加。底盘抵抗线是孔网参数设计的关键,其计算公式为:

$$W_d=K_d \times d \times \sqrt{(R_c/10)}$$

其中, $K_d$ 为底盘抵抗线系数,硬岩取25-30,中硬岩取30-35,软岩取35-40; $d$ 为孔径(mm); $R_c$ 为岩石单轴抗压强度(MPa)。

孔距 $a=K \times W_d$ , $K$ 为孔距系数,根据起爆方式调整:逐排起爆 $K=1.2-1.3$ ,微差起爆 $K=1.3-1.5$ 。例如,某铜矿采用130mm孔径, $R_c=55\text{MPa}$ ,硬岩 $K_d$ 取28,计算得 $W_d=28 \times 130 \times \sqrt{(55/10)}=28 \times 130 \times 2.345 \approx 8670\text{mm}$ ,取8.7m;采用微差起爆 $K=1.4$ ,孔距 $a=1.4 \times 8.7 \approx 12.2\text{m}$ ,排距 $b=a/1.4 \approx 8.7\text{m}$ ,形成菱形布孔。

#### 3.2.3 炸药单耗优化

炸药单耗( $q$ )是单位体积岩体所需的炸药量,直接影响爆破成本与破碎效果,其理论计算公式为:

$$q=q_0 \times f(R_c) \times f(K_v) \times f(H)$$

其中, $q_0$ 为基准炸药单耗(硬岩取 $0.35-0.45\text{kg/m}^3$ ,中硬岩取 $0.25-0.35\text{kg/m}^3$ ,软岩取 $0.15-0.25\text{kg/m}^3$ ); $f(R_c)$ 为岩石强度修正系数, $R_c$ 每增加10MPa,系数增加0.1; $f(K_v)$ 为岩体完整性修正系数, $K_v$ 每降低0.1,系数降低0.08; $f(H)$ 为台阶高度修正系数, $H$ 每增加5m,系数增加0.05。

实际工程中,需通过正交试验法优化炸药单耗。例如,某石灰石矿以 $q$ 、 $a$ 、 $b$ 为试验因素,每个因素取3个水平,进行 $L_9(3^3)$ 正交试验,结果表明当 $q=0.32\text{kg/m}^3$ 、 $a=10\text{m}$ 、 $b=8\text{m}$ 时,大块率( $> 500\text{mm}$ )最低,为8.5%,较原参数降低12%<sup>[2]</sup>。

#### 3.2.4 装药结构与起爆顺序优化

装药结构优化需根据岩体均匀性调整:均质岩体采用连续装药,确保能量均匀释放;非均质岩体采用间隔装药,在软岩段减少装药密度,硬岩段增加装药密度。间隔装药的间隔长度通常为0.5-1.0m,间隔材料采用炮泥或空气柱,空气柱间隔可降低爆破振动峰值20%-30%。

起爆顺序优化的核心是采用微差起爆技术,通过控制相邻炮孔的起爆时差(25-50ms),使前排爆破形成的自由面为后排爆破提供有利条件,同时避免应力波叠加导致的振动超标。起爆网络采用“孔内延期+孔外延期”的复式网络,孔内使用高精度延期雷管控制排间时差,孔外使用导爆管控制孔间时差,确保起爆可靠性。

### 3.3 参数优化的数值模拟验证

数值模拟是参数优化的重要工具,可通过ANSYS/LS-DYNA软件模拟爆破过程中的应力分布、岩体破碎及振动传播规律。以某公路路堑爆破工程为例,原参数为 $a=8\text{m}$ 、 $b=6\text{m}$ 、 $q=0.3\text{kg/m}^3$ ,模拟结果显示爆破振动速度达 $1.8\text{cm/s}$ ,超过规范限值( $1.5\text{cm/s}$ )。通过优化孔距至7m、炸药单耗至 $0.27\text{kg/m}^3$ ,模拟振动速度降至 $1.3\text{cm/s}$ ,大块率从15%降至9%,为现场施工提供了可靠依据。

## 4 中深孔爆破效果控制技术体系

爆破效果控制是中深孔爆破工程的核心目标,其控制范围涵盖破碎块度、爆破振动、飞石危害、边坡稳定性等多个维度,需建立“事前预防、事中控制、事后评估”的全流程技术体系,确保爆破效果满足工程要求。

### 4.1 破碎块度控制

破碎块度是衡量爆破效果的核心指标,直接影响后续铲装、运输效率和生产成本。理想的破碎块度应满足“最大块度小于挖掘机斗容的1/3,块度分布均匀”的要求。控制破碎块度的关键技术包括:一是优化孔网参数,通过调整炮孔密集系数和抵抗线,确保爆破能量在岩体中均匀分布,避

避免因能量集中或不足导致的大块或粉化；二是采用分段装药结构，针对岩体不同深度的坚固程度差异，设置不同的药包位置和药量，实现分层破碎；三是利用预裂爆破技术，在主爆区与保留岩体之间设置预裂孔，通过预裂孔形成的裂隙引导主爆区能量释放，减少大块产生。此外，还可通过在炮孔内设置聚能管，增强炸药的定向破碎作用，提升块度均匀性。对于已产生的大块，可采用二次破碎技术（如浅孔爆破、机械破碎）进行处理，但需控制二次破碎的炸药用量，避免影响周边岩体稳定性<sup>[3]</sup>。

#### 4.2 爆破振动控制

爆破振动是中深孔爆破最主要的环境影响因素，过大的振动可能导致周边构筑物开裂、边坡失稳等问题，其控制需遵循“源头减量、传播阻隔、监测预警”的原则。

源头减量技术的核心是优化起爆参数，通过采用微差起爆技术，将总炸药量分散到多个段次，控制单段起爆药量，避免能量集中释放。单段起爆药量的计算可采用萨道夫斯基公式： $V=K \times (Q^{1/3}/R)^{\alpha}$ ，其中V为允许振动速度(mm/s)，Q为单段起爆药量(kg)，R为爆破中心至构筑物的距离(m)，K、 $\alpha$ 为场地系数(需通过现场试验确定)。根据周边构筑物的安全等级(如民房、桥梁、隧道)，确定允许振动速度，再反算单段起爆药量。例如，对于距离爆破区50m的民房，允许振动速度取2.0mm/s，若K=200、 $\alpha=1.8$ ，则单段起爆药量应控制在50kg以内。

传播阻隔技术主要通过设置减震沟、缓冲层等措施，削弱振动波的传播能量。减震沟通常设置在主爆区与构筑物之间，沟深应大于振动波的传播深度(一般取3-5m)，沟宽取0.5-1.0m，通过沟内空气的缓冲作用降低振动波强度；缓冲层则在爆区周边铺设沙袋、橡胶垫等柔性材料，吸收振动能量。此外，合理选择爆破部位，避开岩体中的软弱夹层和断层，避免振动波在软弱结构面处产生放大效应。

监测预警技术是振动控制的重要保障，需在爆破前布设振动监测仪(如拾震器、数据采集仪)，监测点应设置在距离爆区最近的构筑物基础、边坡坡顶等关键位置，实时采集振动速度和频率数据。若监测数据超过允许值，需立即调整爆破参数(如减少单段药量、增大延期时间)，确保振动控制在安全范围内。

#### 4.3 飞石危害控制

飞石是中深孔爆破最危险的安全隐患，其飞行距离可达数百米，易造成人员伤亡和设备损坏，控制飞石需从“限制初速度、阻挡飞行路径”两方面入手。

限制飞石初速度的核心是优化装药和堵塞参数。堵塞长度是控制飞石的关键，堵塞长度过短，炸药能量易从孔口泄漏，导致飞石初速度增大；堵塞长度过长，会降低炸药能量利用率。通常堵塞长度取(20-35)d，对于孔径130mm的炮孔，堵塞长度应不小于2.6m。堵塞材料优先选用炮泥(由黏土和砂按3:1混合制成)，其密度大、可塑性强，能有效封堵孔口，减少能量泄漏。同时，控制装药高度，确保药包顶部与堵塞段之间留有足够的缓冲距离，避免炸药直接作用

于堵塞物。

阻挡飞行路径的关键是设置安全防护措施，常用的防护方式包括炮孔覆盖和爆区围挡。炮孔覆盖可采用“铁丝网+沙袋”或“帆布+钢筋网”的组合形式，覆盖物需牢固固定在炮孔上方，防止被爆破气流掀翻；爆区围挡则在爆区周边设置高度2-3m的防护栏，栏内铺设防护网，阻挡飞石飞出。此外，还需明确爆破安全警戒范围，根据飞石最大可能飞行距离(通常取200-300m)设置警戒区，爆破前清空区内人员和设备，确保安全。

#### 4.4 边坡稳定性控制

在边坡开挖工程中，中深孔爆破可能导致边坡岩体产生裂隙，影响边坡稳定性，其控制需结合“爆破设计与边坡支护”的一体化思路。

爆破设计阶段，需采用“预裂爆破+光面爆破”的组合技术，在边坡轮廓线处设置预裂孔和光面孔。预裂孔的起爆时间早于主爆孔，通过爆破形成一条连续的裂隙，阻断主爆区振动波向边坡岩体的传播；光面孔则主爆孔起爆后起爆，通过控制装药量和起爆顺序，使边坡面平整，减少超挖和欠挖。预裂孔和光面孔的间距应小于主爆孔，通常取80-100cm，装药量为中深孔的1/3-1/2，采用不耦合装药结构，避免炸药直接作用于孔壁。

爆破后需及时对边坡进行支护处理，根据边坡高度和岩体稳定性，采用锚杆支护、喷锚支护或挡土墙支护等方式。锚杆支护通过将锚杆植入边坡岩体内部，增强岩体的整体性；喷锚支护则在锚杆基础上喷射混凝土，形成保护层，防止岩体风化；挡土墙支护适用于边坡坡度较陡的场景，通过墙体承受边坡岩体的侧压力。此外，还需定期对边坡进行监测，采用全站仪、位移计等设备监测边坡的沉降和位移，若发现异常变形，及时采取加固措施<sup>[4]</sup>。

## 5 结语

中深孔爆破参数优化需以岩体分级为基础，核心在于实现孔径、孔深、孔网参数、炸药单耗等指标与岩体特性的精准匹配，可有效降低大块率与爆破振动，提升爆破效率。配套的振动控制、飞石防护等技术，形成了全流程爆破效果控制体系，解决了中深孔爆破的安全与效率矛盾。随着技术的不断创新，中深孔爆破将在安全、高效、绿色的方向上实现更大突破。

#### 参考文献

- [1] 王金刚,高展.崩落法开采矿山中深孔爆破参数的优化[J].河北冶金,2025,(07):73-79+92.
- [2] 谷亚州,李闯,陈南海,等.扇形中深孔爆破孔网参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(04):96-103.
- [3] 孙刚友,金爱兵,武耀硕,等.急倾斜薄矿脉硬岩中深孔爆破参数优化研究[J].金属矿山,2025,(04):174-183.
- [4] 刘国栋,于鹏辉,刘伟军,等.三山岛金矿中深孔爆破参数混沌优化反演研究[J].现代矿业,2025,41(02):57-61.

# Trends in Vocational Skills Training for Elevator Industry

Zongming Yang Wei Liao Xiaoli Luo

Chongqing Jinzhi Vocational Training School, Chongqing, 400023, China

## Abstract

With the rapid development and technological iteration in the elevator industry, high-quality skilled talents have become the core drivers of high-quality industry growth. As a key vehicle for talent cultivation, elevator vocational skills training has achieved industry-wide consensus on the “deep integration of skill enhancement and job application.” However, the current training system still faces shortcomings in content, models, and evaluation mechanisms. Systematic planning and precise alignment with job requirements are needed to establish a scientific training framework, improve training quality and efficiency, and support the sustained and healthy development of the elevator industry. Based on this, exploring innovative training pathways aligned with industry trends is of great significance for strengthening talent development and promoting the healthy growth of the sector. This paper examines the development trends of elevator vocational skills training and proposes targeted recommendations for industry reference.

## Keywords

Elevator Skills; Vocational Training; Development Trends; talent cultivation

## 电梯职业技能培训发展趋势

杨宗明 廖伟 骆晓莉

重庆市金质职业培训学校, 中国·重庆 400023

## 摘要

随着电梯行业高速发展与技术迭代, 高素质技能人才成为驱动行业高质量发展的核心要素。电梯职业技能培训作为人才培养关键载体, “技能提升与岗位应用深度融合”已成行业共识。当前培训体系尚存内容、模式与评估机制短板, 需通过系统化规划、精准对接岗位需求, 构建科学培训体系, 提升培训质效, 助力电梯行业持续健康发展。基于此, 立足行业趋势探索培训创新路径, 对健全人才队伍、推动行业健康发展意义重大。本文围绕电梯职业技能培训发展趋势展开探讨, 提出针对性建议, 以供行业参考。

## 关键词

电梯技能; 职业培训; 发展趋势; 人才培养

## 1 引言

电梯行业处于技术创新与市场拓展双重驱动期, 专业技能人才需求迫切, 人才培养质量直接关乎行业高质量发展。伴随行业标准持续更新与智能化技术普及应用, 传统技能培养模式难以适配新需求。目前, 从业人员素质参差不齐, 人才短缺、技能与岗位脱节、培训体系不完善等问题凸显, 加剧市场竞争压力, 加之服务质量下降、老旧电梯逐步增多等隐患日益凸显。

## 2 电梯职业技能培训的意义

### 2.1 提升电梯技能人才素质

电梯安装、调试、维修、检验、检测等岗位专业性、风险性高, 要求从业人员兼具扎实理论、娴熟实操技能、强烈安全意识与高效应急处置能力。系统化职业技能培训,

可实现理论与实践深度融合, 通过标准化流程强化岗位胜任力, 全面提升职业素养。高素质人才队伍是技术升级核心动力, 助力行业向智能化、专业化迈进, 增强企业核心竞争力。

### 2.2 提升培训体系的科学性

传统培训重理论、轻实操, 与现代技术发展需求脱节, 培训效果欠佳。电梯职业技能培训是行业发展基础支撑, 体系科学性是保障人才培养质量的关键。构建科学培训体系, 需依托行业标准, 覆盖电梯设计、安装、调试、维护等全流程, 丰富内容维度, 优化实施路径, 打破传统模式局限, 实现培训质效跃升。

### 2.3 有助于行业标准化建设

电梯行业已形成完善标准体系, 职业技能培训是连接行业标准与实操的桥梁, 更是推动行业规范化的核心抓手。通过标准化培训, 可促使电梯安装、维修等环节实现规范化, 进而保障电梯运行的安全与服务质量。电梯职业技能培训作为行业规范化的关键环节, 既是连接行业标准与实际操作的桥梁, 也是行业规范化建设的保障<sup>[1]</sup>。在实际工作中, 应注

【作者简介】杨宗明(1989—), 男, 中国重庆人, 本科, 工程师, 从事工程技术质量研究。

重培训内容的标准化,以“理论+实践”模式持续优化,实现从业人员技能与行业服务质量双重提升,筑牢行业发展根基。

### 3 电梯职业技能培训中存在的问题

#### 3.1 培训内容不够系统

由于行业标准持续更新,电梯培训未能完全契合实际需求,不同企业在培训内容和重点理解存在差异。当前,部分培训机构对技能要求的理解不够深入,忽略了电梯安全对于行业发展的重要意义,简单地将电梯技能视为基础性工作,认为在实际培训中无需深入讲解,这种观念影响了电梯行业的整体发展水平,在一定程度上阻碍了电梯技能培训的深入应用。此外,部分培训机构的培训体系缺乏系统化规划,致使电梯技能培训在实施过程中缺乏科学依据。电梯培训的碎片化理念,会妨碍培训效果在行业内的全面推广。

#### 3.2 培训方式不够创新

电梯培训实践性极强,实操训练、案例分析等教学方法的应用广度与深度均有待提升。当前,多数机构、企业仍沿用传统模式,以理论讲解和简单示范为主,方式单一、内容滞后,无法满足学员实操需求。同时,针对不同学员知识基础与岗位需求,缺乏个性化方案设计,培训效果与质量达不到预期。

#### 3.3 培训评估不够完善

部分电梯培训与行业实际需求存在脱节,在培训实施过程中,许多问题频发,对电梯技能提升和培训效果产生影响。对于电梯培训效果评估,需要建立科学的评估机制,如果评估机制不健全、被忽视会出现培训效果不佳的状况,培训质量、学员满意度等指标缺失,会给电梯行业带来安全隐患和人才流失<sup>[2]</sup>。电梯职业技能培训在行业需求和实际应用中,通过理论与实践结合,实现了培训质量的初步提升。从行业视角,现有评估体系未能充分结合理论与实践双重维度,难以客观反映培训工作的实际成效。

## 4 电梯职业技能培训发展策略

#### 4.1 完善培训体系的构建

以行业政策为引领,以岗位需求为核心,构建科学系统的电梯职业技能培训体系。在行业政策支持下,电梯职业技能培训通过系统化建设,实现了培训质量的提升。而在行业协同的框架下,不仅注重培训内容,而且注重培训方法和培训效果由多方共同参与,这与行业发展趋势相契合,优化了培训体系,达到科学化、系统化的目标。电梯培训需要科学系统的规划,培训设计应以行业需求为导向,从行业发展的实际需求出发,才能制定有效的培训方案。在实际培训当中,培训机构要注重到电梯行业最新技术动态,明确培训目标,形成理论、实操、案例等多维度培训体系,在培训实施过程中实现系统化、规范化,更有针对性的培训效果。培训体系设计根据行业标准的更新情况,及时调整培训内容。例

如:当前电梯培训体系存在不足在于培训机构对新技术应用不够重视,对电梯安全规范的理解不够深入<sup>[3]</sup>。因此,培训机构在制定培训计划时,要制定科学的培训策略,客观分析行业需求、学员特点等,做好培训与行业需求的对接,明确培训目标与内容,结合行业发展趋势,保障培训质量与培训效果。在培训实施的前期,要调研去了解学员需求,也要考虑行业发展趋势,这样能够充分满足行业需求。

#### 4.2 提升培训方式的创新性

推动多方协作,鼓励机构加强经验交流,突破资源限制实现培训方式升级。电梯培训方式的创新需要多方协作,各培训机构、企业之间加强沟通,即便面临资源限制,在培训实施过程中也要注重创新。培训内容和培训方法需要不断优化,做好培训内容设计及培训效果评估,最大限度避免出现培训效果不佳的后果。如果培训方式陈旧,就要及时更新。培训机构还应定期组织培训研讨,进行内容更新,尽可能采用新型培训方式,也要注重培训效果,避免培训流于形式,注重实效、互动。例如:电梯培训要注重实操训练,不仅注重理论讲解,还注重案例分析,同时注重模拟演练,如果学员的反馈或培训效果不佳,则应调整培训方式,各培训机构应该定期进行培训方式的创新与实践。培训质量决定培训效果的水平,保障培训效果是培训机构的任务。目前,电梯培训处于转型升级阶段,培训机构需加强创新,行业则需提供支持,进而提升培训质量及效果。

#### 4.3 深化校企(机构)协同合作

以行业政策为支撑,推动培训机构与电梯企业深度合作。行业政策下,完善电梯职业技能培训体系,有助于构建行业标准体系,运用行业规范与标准,推动电梯行业规范化发展。电梯企业借助互联网、远程教育等技术,可高效开展培训工作,确保培训内容具有专业性,从而更充分地满足行业发展的需求。例如,完善电梯培训体系需要培训机构与企业通力合作,开展理论学习与实操训练。在电梯安装维修的培训过程中,遵循标准化流程能够提高技能水平、规范安全操作,同时增强应急处理能力<sup>[4]</sup>。电梯培训体系是行业发展支撑,企业应重视完善。培训体系建设能让学员形成专业技能和安全意识,培训机构借助技术提升培训效果、质量和安全水平,为行业发展奠定基础。行业政策支持下,培训体系与行业标准融合,通过系统化培训提升技能并优化,实现完善培训体系目标。

#### 4.4 提高培训质量的保障机制

将培训质量作为核心目标,从制度建设、师资配备、内容优化等维度构建质量保障体系。无论培训机构规模大小还是培训内容深浅,培训质量始终是核心所在,培训机构应该强化质量意识,为行业发展提供高质量人才,并对行业标准、行业发展、人才培养进行引导。针对电梯培训质量的提升问题,只有建立完善的质量保障机制,才能实现培训质量的持续提升。培训机构要注重培训质量的提升,通过科学评

估去了解培训效果,做好培训与行业需求的沟通,互相支持,通过持续改进对培训质量进行优化,保障培训效果的持续提升。例如:从行业视角来看,电梯培训质量的提升,这也符合行业发展规律,从而推动行业整体进步。针对电梯培训质量的提升,可以建立评估体系,并加强监督,进一步优化培训内容,对培训质量进行持续改进<sup>[5]</sup>。因此,培训质量保障一定要从制度、师资、内容等多方面,加大质量保障力度,确保培训质量得到提升。在实际操作中,培训机构也要注重质量提升,加快培训体系的完善,在行业标准制定过程中,进一步完善培训质量保障体系。伴随着行业规范化的推进,电梯培训的质量要求也能够逐步提升,培训质量得到保障,从而推动行业高质量发展。

#### 4.5 建立行业协同发展机制

加强企业、培训机构协作联动,推动培训内容与行业标准精准对接。对于电梯行业,应该加强合作,在培训体系完善之后,再去制定行业标准的培训内容,保障培训质量,开展行业协同的培训活动,保障电梯培训体系的科学性,这不仅符合行业发展规律,也促进培训体系的完善。培训机构要保障培训体系的科学性,加强行业标准与培训内容的衔接,进而提升培训质量。例如:在行业规范下,电梯培训机构联合,通过行业标准制定,师资共享等措施,完善培训体系,基于行业需求,达到了培训质量提升的目的。行业协同,培训机构也要积极参与,推动行业标准化,促进电梯行业发展,在行业发展中,电梯培训体系的完善不仅体现培训机构的专业能力,也体现行业的协同能力。在行业协同的培训体系构建当中,可以整合资源和师资力量,做好培训内容与行业需求的对接,进而提升培训质量,实现行业发展的目标<sup>[6]</sup>。行业培训体系结合行业标准与人才培养。行业协同,行业标准在行业实践中,同时行业标准以行业规范的方式。行业标准与培训体系。行业协同,行业标准、培训内容与培训方式并重,通过行业标准制定或行业规范制定。培训机构并积极参与。

#### 4.6 加强师资队伍建设

以行业需求为导向,完善师资选拔标准,选拔兼具理论、

实操与教学能力的复合型人才。改变传统师资选拔方式,设立专业标准,师资选拔非单一能力,而是理论知识、实操能力、教学能力。整体规划师资队伍建设,组织专业培训,深度提升师资水平,持续优化师资结构。深化师资与行业标准的结合。建立师资库,不再仅靠个人经验,而是理论型、实操型、教学型等复合型人才。培训机构对师资进行严格考核,为行业提供高质量师资,师资可与行业专家进行交流。将师资队伍建设,加强师资培训。制定培训计划,细化培训内容,构建系统的师资培训体系。设置基于行业需求的培训标准,确保师资水平符合行业要求。培训机构必须重视师资队伍建设,具备专业化、系统化的培训能力。

## 5 结语

电梯职业技能培训是支撑行业持续健康发展的关键基石。面对行业技术升级与人才需求变革,必须摒弃传统培训模式的短板,通过构建系统化培训体系、创新培训方式、深化行业协同、健全质量保障机制等举措,推动培训工作与行业标准、岗位需求深度融合。唯有以高质量培训培育高素质人才,才能有效解决行业人才短缺、技能脱节、服务不佳等实际问题,助力电梯行业实现高质量发展目标。

### 参考文献

- [1] 陈润联.电梯职业技术培训的教学特点与教学方法探讨[J].中国电梯,2023(7):78-80.
- [2] 半月谈记者.老旧小区装电梯,基层有啥招?[J].半月谈,2024(8):32-34.
- [3] 刘晓福.电梯消防安全运维监管中存在的问题与改进措施研究[J].消防界(电子版),2024(23):2-3.
- [4] 卫排锋,余晓毅,肖剑,等.依托市级电梯安全科普基地培育电梯特种职业核心素养[J].中国设备工程,2023(12):255-257.
- [5] 随龙飞,王伟,孔亚楠.电梯检测机构监管效能提升的策略分析[J].新潮电子,2025(4):133-135.
- [6] 鄢霏然,周青,刘治宏.电梯定期检验与维护的优化策略研究[J].西部特种设备,2025,8(4):18-23.